

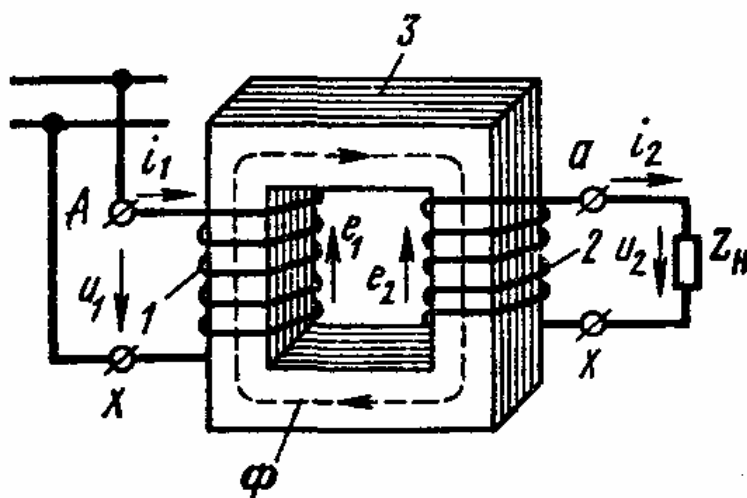
Министерство образования и науки Украины
Харьковская национальная академия городского хозяйства

М.Л. Глебова, А.И. Кузнецов, И.Т. Карпалюк, М.В. Чернявская

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ТРАНСФОРМАТОРЫ

(для студентов и слушателей второго высшего образования направления
подготовки 6.050701 «Электротехника и электротехнологии»,
6.050702 «Электромеханика»)

Учебное пособие



Харьков – ХНАГХ – 2007

Глебова М.Л. Учебное пособие. Электрические машины. Трансформаторы (для студентов и слушателей второго высшего образования направления подготовки 6.050701 «Электротехника и электротехнологии», 6.050702 «Электро-механика») / Глебова М.Л., Кузнецов А.И., Карпалюк И.Т., Чернявская М.В.; Харьк. нац. акад. город. хоз-ва. – Х.: ХНАГХ, 2007. – 180 с.

Авторы: М.Л. Глебова,
А.И. Кузнецов,
И.Т. Карпалюк,
М.В. Чернявская

Рецензент: д.т.н. професор В.Б. Финкельштейн

Рекомендовано кафедрой электротехники,
протокол №5 от 18.12.2006 г.

СОДЕРЖАНИЕ

с.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ.....	4
1.1 Классификация электрических машин.....	4
1.2 Номинальные данные электрических машин.....	8
1.3 Требования, предъявляемые к электрическим машинам.....	11
1.4 Особенности конструкции электрических машин, определяемые условиями их эксплуатации	14
1.5 Электротехнические материалы, применяемые в электрических машинах.....	27
2 ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	35
2.1 Назначение и области применения трансформаторов.....	35
2.2 Принцип действия трансформатора	39
2.3 Устройство трансформаторов	42
2.4 Охлаждение трансформаторов.....	60
2.5 Идеализированный трансформатор.....	68
2.6 Намагничивающий ток и ток холостого хода	72
2.7 Комплексные уравнения и векторная диаграмма	78
2.8 Схема замещения трансформатора.....	82
2.9 Изменение вторичного напряжения и внешние характеристики.....	89
2.10 Особенности работы трансформаторов малой мощности	94
2.11 Коэффициент полезного действия трансформатора.....	96
2.12 Преобразование трехфазного тока	100
2.13 Группы соединений обмоток	108
2.14 Параллельная работа трансформаторов.....	111
2.15 Автотрансформатор	114
2.16 Многообмоточные трансформаторы.....	119
2.17 Регулирование напряжения в трансформаторах	124
2.18 Трансформаторы с плавным регулированием напряжения	132
2.19 Переходные процессы в трансформаторах.....	135
2.20 Перенапряжения в трансформаторах	142
2.21 Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов	150
2.22 Измерительные трансформаторы	157
2.23 Трансформаторы для вентильных преобразователей.....	161
2.24 Трансформаторы для электродуговой сварки, преобразования числа фаз и частоты	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	179

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

1.1 Классификация электрических машин

Классификация по назначению. Электрические машины по назначению подразделяют на следующие виды:

*электромашинные генераторы*¹, преобразующие механическую энергию в электрическую. Их устанавливают на электрических станциях и различных транспортных установках: автомобилях, самолетах, тепловозах, кораблях, передвижных электростанциях и др. На электростанциях они приводятся во вращение с помощью мощных паровых и гидравлических турбин, а на транспортных установках — от двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. В ряде случаев генераторы используют в качестве источников питания в установках связи, устройствах автоматики, измерительной техники и пр.;

электрические двигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую; они приводят во вращение различные машины, механизмы и устройства, применяемые в промышленности, сельском хозяйстве, связи, на транспорте, в военном деле и быту. В современных системах автоматического управления их используют в качестве исполнительных, регулирующих и программирующих органов;

электромашинные преобразователи, преобразующие переменный ток в постоянный и, наоборот, изменяющие величину напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и др. Их широко используют в промышленности, на транспорте и в военном деле, хотя в последнее десятилетие роль электромашинных преобразователей существенно уменьшилась вследствие применения статических полупроводниковых преобразователей ;

электромашинные компенсаторы, осуществляющие генерирование реактивной мощности в электрических установках для улучшения энергетических показателей источников и приемников электрической энергии;

¹ Ниже используются сокращенные термины — генераторы, электродвигатели, преобразователи, компенсаторы и усилители.

электромашинные усилители, используемые для управления объектами относительно большой мощности посредством электрических сигналов малой мощности, подаваемых на их обмотки возбуждения (управления). Роль электромашинных усилителей в последнее время также уменьшилась из-за широкого применения усилителей, выполненных на полупроводниковых элементах (транзисторах, тиристорах);

электромеханические преобразователи сигналов, генерирующие, преобразующие и усиливающие различные сигналы. Их выполняют обычно в виде электрических микромашин и широко используют в системах автоматического регулирования, измерительных и счетно-решающих устройствах в качестве различных датчиков, дифференцирующих и интегрирующих элементов, сравнивающих и регулирующих органов и др.

Классификация по роду тока и принципу действия. Электрические машины по роду тока делят на машины переменного и постоянного тока. Машины переменного тока в зависимости от принципа действия и особенностей электромагнитной системы подразделяют на трансформаторы, асинхронные, синхронные и коллекторные машины.

Трансформаторы широко применяют для преобразования напряжения: в системах передачи и распределения электрической энергии, в выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

Асинхронные машины используют главным образом в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов и пр. В системах автоматического регулирования широко используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы, а также сельсины.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов переменного

тока промышленной частоты на электрических станциях и генераторов повышенной частоты в автономных источниках питания (на кораблях, самолетах и т.п.). В электрических приводах большой мощности применяют также синхронные электродвигатели. В устройствах автоматики широко используют различные синхронные машины малой мощности (реактивные, с постоянными магнитами, гистерезисные, шаговые, индукторные и пр.).

Коллекторные машины переменного тока используют сравнительно редко и главным образом в качестве электродвигателей. Они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода. В устройствах автоматики, а также в различного рода электробытовых приборах применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе.

Машины постоянного тока применяют в качестве генераторов и электродвигателей в устройствах электропривода, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах: железнодорожный и морской транспорт, прокатные станы, электротрансмиссии большегрузных автомобилей, грузоподъемные и землеройные машины, сложные металлообрабатывающие станки и пр., а также в тех случаях, когда источниками электрической энергии для питания электродвигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т.п.).

Генераторы постоянного тока часто применяют для питания устройств связи, зарядки аккумуляторных батарей, в качестве основных источников питания на транспортных установках (автомобилях, самолетах, тепловозах, пассажирских вагонах). Однако в последнее время генераторы постоянного тока заменяются генераторами переменного тока, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

В системах автоматического регулирования машины постоянного тока широко используют в качестве электромашинных усилителей, исполнительных двигателей и тахогенераторов.

В зависимости от назначения электрические микромашины автоматиче-

ских устройств подразделяются на следующие группы:

силовые микродвигатели, приводящие во вращение различные механизмы автоматических устройств, самопишущих приборов и пр.;

управляемые (исполнительные) двигатели, преобразующие подводимый к ним электрический сигнал в механическое перемещение вала, т. е. отрабатывающие определенные команды;

тахогенераторы, преобразующие механическое вращение вала в электрический сигнал — напряжение, пропорциональное частоте вращения вала;

вращающиеся трансформаторы, дающие на выходе напряжение, пропорциональное той или иной функции угла поворота ротора, например синусу или косинусу этого угла или самому углу;

машины синхронной связи (сельсины, магнесины), осуществляющие синхронный и синфазный поворот или вращение нескольких механически не связанных между собой осей;

микромашинны гироскопических приборов (гироскопические двигатели, датчики угла, датчики момента), осуществляющие вращение роторов гироскопов с высокой частотой и коррекцию их положения;

электромашинные преобразователи и усилители.

Электрические микромашинны первых двух групп часто называют *силовыми*, а третьей — пятой групп — *информационными*.

Классификация по мощности. Электрические машинны по мощности условно подразделяют на микромашинны, машинны малой, средней и большой мощности.

Микромашинны имеют мощность от долей ватта до 500 Вт. Эти машинны работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной и повышенной (400 — 2000 Гц) частоты.

Машинны малой мощности — от 0,5 до 10 кВт. Они работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной или повышенной частоты.

Машины средней мощности — от 10 кВт до нескольких сотен киловатт².

Машины большой мощности — свыше нескольких сотен киловатт. Машины большой и средней мощности обычно предназначают для работы на постоянном или переменном токе нормальной частоты³.

Классификация по частоте вращения. Электрические машины по частоте вращения условно подразделяют на: *тихоходные* — с частотами вращения до 300 об/мин; *средней быстроходности* — 300—1500 об/мин; *быстроходные* — 1500 — 6000 об/мин; *сверхбыстроходные* — свыше 6000 об/мин. Микромашины выполняют для частот вращения от нескольких оборотов в минуту до 60000 об/мин; машины большой и средней мощности — обычно до 3000 об/мин.

1.2 Номинальные данные электрических машин

Каждая электрическая машина имеет паспортную табличку, выбитую на металлической пластине и прикрепленную к корпусу. В этой табличке указаны тип машины и ее *номинальные данные*, характеризующие основные энергетические показатели и условия работы, на которые она рассчитана. К номинальным данным относятся: мощность, напряжение, ток, частота вращения, частота переменного тока, коэффициент полезного действия (КПД), число фаз, коэффициент мощности и режим работы (длительный, кратковременный и т. п.)⁴. Кроме того, в паспортной табличке приведены следующие данные: завод-изготовитель, год выпуска, класс изоляции, а также дополнительные данные, необходимые для монтажа и эксплуатации машины (масса, схема включения обмоток и др.). Термин “номинальный” можно применять и к величинам, не приведенным в паспортной табличке, но относящимся к ее номинальному режиму, например номинальный вращающий момент, номинальное скольжение и др.

² * Для трансформаторов до 1000 кВ • А.

³ Кроме некоторых специальных случаев (авиация, морской флот и др.), где иногда используют довольно мощные машины повышенной частоты.

⁴ Подробно режимы работы описаны в гл. 8.

Номинальной мощностью электрической машины называют мощность, на которую рассчитана данная машина по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. Для электрических двигателей под номинальной мощностью понимают полезную механическую мощность на валу, выраженную в ваттах или киловаттах; для генераторов постоянного тока — полезную электрическую мощность на зажимах машины (в ваттах или киловаттах); для генераторов переменного тока — полную электрическую мощность на зажимах (в вольт-амперах или киловольт-амперах). Номинальные мощности всех видов электрических машин и трансформаторов стандартизованы; точно так же стандартизованы номинальные частоты вращения электрических машин.

Электрические машины могут работать и при неноминальных условиях (уменьшенная или увеличенная мощность, напряжение и ток, отличные от номинальных, и т. п.). Однако при работе в этих условиях энергетические показатели машины отличаются от паспортных данных. Обычно при нагрузках, меньших номинальной, КПД и коэффициент мощности машины меньше номинальных. При нагрузках, больших номинальной, появляется опасность чрезмерного повышения температуры частей электрической машины, в первую очередь ее обмоток, что может привести к преждевременному выходу из строя изоляции обмоток и, следовательно, всей машины. Максимально допустимая температура обмотки зависит от свойств применяемой изоляции (ее класса) и срока службы машины и составляет от 105 до 180 °С. Предельно допустимые температуры различных частей обмоток регламентируются общесоюзными стандартами (ГОСТами), имеющими силу законов.

В ГОСТы на электрические машины и трансформаторы включаются также другие нормативные материалы, главным образом определяющие допустимые кратковременные перегрузки и методы испытания машины и отдельных ее частей, а также основные условия эксплуатации машины данного типа. Материалы, включаемые в ГОСТы, проверены многолетней практикой производства и эксплуатации, т. е. имеют статистическое обоснование.

Эксплуатация и производство новых видов электрических машин нормируются *техническими условиями*, которые согласовываются и утверждаются организациями, проектирующими, изготавливающими и эксплуатирующими данные машины.

Электрические машины являются обратимыми, т. е. они могут работать и в генераторном, и в двигательном режимах. Точно так же в электромашинном преобразователе и трансформаторе направление преобразования электрической энергии может быть изменено на обратное. Однако выпускаемые электропромышленностью машины обычно предназначаются для предпочтительной работы в каком-то одном режиме. Это позволяет лучше приспособить машину к требованиям эксплуатации, не делая ее чрезмерно тяжелой и дорогой.

Электрические машины выпускают на стандартные напряжения, согласованные со стандартными напряжениями электрических сетей. Стандартные напряжения генераторов примерно на 5—10% выше, чем у двигателей; например, если стандартное напряжение двигателя 220 В, то стандартное напряжение генератора — 230 В и т. п. Разница в стандартных напряжениях двигателей и генераторов обусловлена потерями напряжения в электрических сетях, к которым подключены генераторы и двигатели. В трансформаторах стандартные напряжения на первичных обмотках принимаются равными “двигательным”, а на вторичных обмотках — “генераторным”.

Машины переменного тока предназначены, как правило, для работы с синусоидальным напряжением, симметричным по фазам. Неизбежные отклонения от этих условий регламентируются ГОСТами. Так, например, длительные отклонения по значению напряжения в сети, питающей силовое оборудование, не должны превышать — 5 % и +10 % ; коэффициент искажения синусоидальной кривой должен быть не более 5 % и т. п. Машины, работающие совместно с вентильными преобразователями, обычно имеют несинусоидальное напряжение и ток, что вызывает в них дополнительные потери энергии и повышает температуру обмоток и магнитопровода машины. Режимы работы таких машин регламентируются специальными техническими условиями.

1.3 Требования, предъявляемые к электрическим машинам

Общие технические требования. Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), по возможности минимальные габаритно-установочные размеры, массу и стоимость: они должны быть простыми по конструкции, несложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации. Общие технические требования для машин общепромышленного применения сформулированы в специальном ГОСТе, а для машин специального исполнения — в соответствующих ГОСТах, учитывающих специфические условия работы этих машин.

Каждая электрическая машина рассчитана на работу, при вполне определенных условиях эксплуатации: режиме нагрузки, допускаемых перегрузках, напряжении, частоте переменного тока, частоте вращения, температуре охлаждающей среды, высоте над уровнем моря, влажности и др. При этом машина должна развивать номинальную мощность и работать без аварий и повреждений в течение установленного времени (обычно в течение времени между периодическими ремонтами).

Надежность работы машины обеспечивается путем закладки достаточных запасов при проектировании, применения высококачественной технологии изготовления и правильной эксплуатации (работы машины в режимах, для которых она спроектирована, и своевременного выполнения профилактических ремонтов).

При проектировании должны быть обеспечены:

1) механическая прочность всех элементов машины (вала, станины, ротора, статора, деталей крепления обмоток и пр.). В частности, машины должны без повреждений и деформаций выдерживать кратковременные перегрузки по току и кратковременные превышения номинальной частоты вращения;

2) электрическая прочность изоляции обмоток, которая не должна терять своих качеств при длительной эксплуатации машины. Изоляция обмоток относительно корпуса, изоляция между обмотками и изоляция между витками об-

моток должна выдерживать повышенное по сравнению с номинальным испытательное напряжение. Сопротивление изоляции всех обмоток должно соответствовать значениям, указанным в ГОСТе;

3) достаточное охлаждение элементов машины, в которых при работе выделяется теплота (магнитопровода, скользящих контактов, обмоток, подшипников). Наиболее чувствительными к нагреванию являются электроизоляционные материалы обмоток, от качества которых зависит допустимый уровень нагрева электрической машины. Максимальные температуры всех частей машины не должны превышать значений, указанных в ГОСТах;

4) выбор электромагнитных нагрузок (плотности тока в обмотках и индукции в элементах магнитопровода), при которых выделяемая в обмотках и магнитопроводе теплота успевает отводиться из машины системой ее охлаждения и не вызывает недопустимого нагрева машины;

5) применение в машинах постоянного тока ряда конструктивных мер (введение добавочных полюсов и компенсационной обмотки, выбор соответствующих марок щеток), которые предотвращают недопустимое искрение на коллекторе при номинальной нагрузке.

В основном электрические машины работают в качестве преобразователей энергии (двигатели, генераторы, трансформаторы, электромашинные преобразователи). Поэтому для уменьшения эксплуатационных расходов важное значение имеют энергетические показатели машин: КПД и коэффициент мощности. При проектировании электрической машины путем оптимального выбора ее основных параметров и электромагнитных нагрузок стремятся получить наивыгоднейшие значения КПД и коэффициента мощности при номинальной нагрузке. Однако эти значения связаны определенным образом с номинальной мощностью машины, поэтому чем меньше номинальная мощность электрической машины, тем меньше ее КПД и коэффициент мощности.

Требования, предъявляемые к электрическим микромашинам автоматических устройств. Электрические микромашины кроме общих технических требований должны также обеспечивать:

- 1) высокую точность преобразования входного сигнала в выходной, например частоту вращения в выходное напряжение в тахогенераторах или управляющее напряжение в частоту вращения в исполнительных двигателях;
- 2) стабильность выходных характеристик при изменении условий эксплуатации, например температуры окружающей среды;
- 3) линейность характеристик при изменении управляющего сигнала и нагрузки;
- 4) высокое быстродействие;
- 5) широкий диапазон регулирования.

Для выполнения этих требований при создании электрической микромашины в ряде случаев отступают от принципов оптимального проектирования, принятых для машин средней и большой мощностей. Так, например, для уменьшения погрешностей в информационных электрических микромашинах выбирают относительно небольшие электромагнитные нагрузки и увеличивают воздушный зазор между статором и ротором. В исполнительных двигателях и других микромашинах, выполняющих силовые функции, для увеличения развиваемого машиной момента электромагнитные нагрузки выбирают максимально возможными по условиям отвода теплоты от машины. Все это приводит к ухудшению энергетических показателей - КПД и коэффициента мощности, которые весьма важны для электрических машин средней и большой мощностей, однако в микромашинах показатели, характеризующие точность, быстродействие, диапазон регулирования, могут иметь преобладающее значение.

Кроме перечисленных требований к отдельным видам микромашин предъявляют специфические требования, обусловленные особенностями их эксплуатации. Так, микромашины, применяемые в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре, должны иметь низкий уровень создаваемых шумов; микромашины, используемые в радиоаппаратуре, не должны создавать значительных радиопомех; при установке их, например, в ядерных реакторах и космических аппаратах должна быть обеспечена радиационная устойчивость.

Все это также накладывает определенные ограничения на конструкции соответствующих микромашин и приводит к увеличению их массы, габаритных размеров и ухудшению энергетических показателей.

1.4 Особенности конструкции электрических машин, определяемые условиями их эксплуатации

Защита от внешних воздействий. Конструктивное выполнение электрической машины во многом определяют требования, предъявляемые к защите ее от внешних воздействий. В зависимости от этого ГОСТ устанавливает буквенно-цифровое обозначение исполнений электрических машин, состоящее из двух букв IP (International Protection) и двух цифр. Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины и от попадания внутрь ее твердых посторонних предметов. Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует степень защиты машины от проникновения в нее влаги.

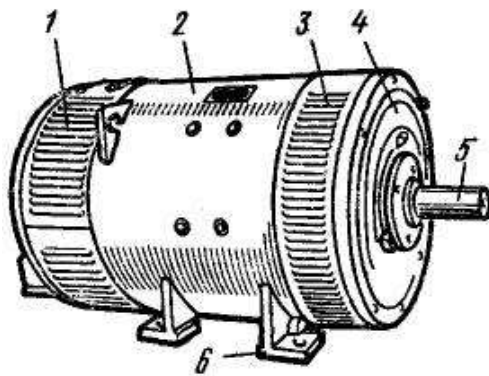


Рис. 1.1 - Двигатель постоянного тока защищенного исполнения (степень защиты IP22):

1, 3 — вентиляционные окна для входа и выхода охлаждающего воздуха; 2 — станина; 4 — подшипниковый щит; 5 — вал; 6 — лапы

Различают следующие виды исполнения электрических машин: открытое, защищенное, каплезащищенное, брызгозащищенное, водозащищенное, пылезащищенное, закрытое, герметичное, взрывозащищенное.

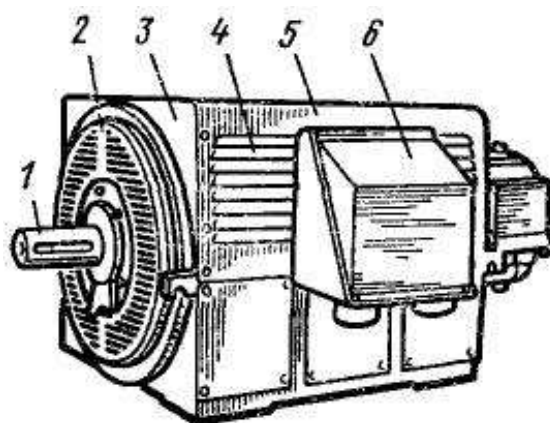


Рис. 1.2 - Асинхронный двигатель каплезащищенного исполнения (степень защиты IP23):

1 — вал; 2,4 — вентиляционные окна для входа и выхода охлаждающего воздуха; 3 — подшипниковый щит; 5 — станина; 6 — коробка с выводами

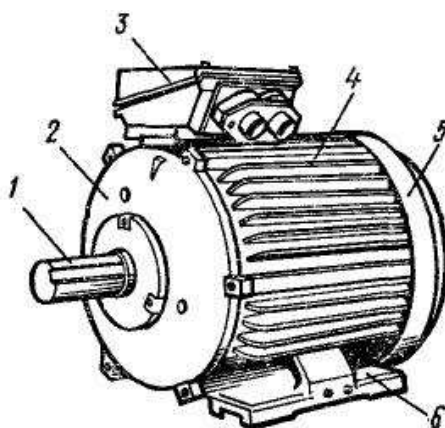


Рис. 1.3 - Асинхронный двигатель закрытого исполнения (степень защиты IP44):

1 — вал; 2, 5 - подшипниковые щиты; 3 — коробка с выводами; 4 - охлаждающие ребра станины; 6 — лапы

Открытое (IP00) — машина не имеет специальных приспособлений, предохраняющих от попадания внутрь посторонних предметов и случайного соприкосновения обслуживающего персонала с токопроводящими и вращающимися частями; машины открытого исполнения встречаются редко и лишь в устаревших конструкциях.

Защищенное (IP21 — IP22 и Др.) — машины имеют специальные приспособления, выполненные, например, в виде соответствующих крышек, кожухов, сеток (рис. 1.1). При этом между крышками и щитами или станиной машины оставляют щели, необходимые для циркуляции воздуха, охлаждающего машину. Такие машины могут устанавливаться только в закрытых поме-

щениях, так как они не имеют приспособлений, защищающих от дождя.

Брызгозащищенное и каплезащищенное (IP23 — IP24 и др.) — машины снабжены приспособлениями, защищающими их от проникновения к токоведущим и вращающимся частям капель воды или водяных брызг (рис. 1.2). В этих машинах все отверстия, расположенные в верхней части корпуса и подшипниковых щитов, закрывают глухими крышками; отверстия, расположенные сбоку, обычно защищают кожухами, крышками и жалюзи, а расположенные снизу — сетками. Такие машины могут устанавливаться на открытом воздухе.

Водозащищенное (IP55 — IP56) — машины недоступны проникновению внутрь струй воды любого направления (также снизу). В них предусмотрены усиленные уплотнения резиновыми прокладками и сальниками. Случайно попавшая в машину вода вытекает из нее или удаляется охлаждающим воздухом. Подобные машины применяют главным образом на судовых установках.

Пылезащищенное (IP65 — IP66) — машины защищены от попадания внутрь пыли в опасных для нормальной работы количествах.

Закрытое (IP44 — IP54) — внутреннее пространство машины изолировано от внешней среды (рис. 1.3). Такие машины применяют для работы в пыльных помещениях, на движущихся транспортных средствах (автомобилях, железнодорожных вагонах, локомотивах), в авиации и пр. К закрытому исполнению относят также машины с охлаждением по замкнутому циклу (воздухом, водородом и др.).

Герметичное (IP67 — IP68) — машины выполняют с особо плотной изоляцией от окружающей среды, предотвращающей сообщение ее с внутренним пространством при определенной разности давлений снаружи и внутри машины. Такие машины могут работать под водой (водонепроницаемые машины), в наполненных газом камерах (газонепроницаемые) и в других подобных средах.

Имеются также исполнения машин, предназначенных для работы в особых условиях:

Взрывозащищенное (взрывобезопасное) — машины могут работать во взрыво- и пожароопасной среде, так как изоляция их токоведущих и вращающихся частей от внешней среды исключает возникновение взрыва и воспламенения газов в окружающем пространстве при искрении и других ненормальных явлениях. При взрыве внутри машины накопившихся газов возникающее пламя не может проникнуть в окружающую среду.

Влагостойкое — для работы в условиях большой влажности.

Морозостойкое — для работы при особо низких температурах и при возможном образовании инея.

Химостойкое — для работы в условиях наличия паров агрессивных химических веществ и при воздействии химических реагентов.

Тропикостойкое — для работы в тропических условиях при возможном образовании плесневых грибов.

Климатические условия и условия размещения. При эксплуатации электрических машин в нормальных климатических условиях температура окружающей среды составляет $(25 \pm 10)^\circ \text{C}$, относительная влажность воздуха 35 — 80% и атмосферное давление 84-106 кПа. В зависимости от макроклиматических условий ГОСТ предусматривает различные их климатические исполнения, которым присваиваются определенные обозначения. Электрические двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках и озерах в макроклиматических районах с умеренным климатом, имеют обозначение — У; с холодным — ХЛ; с влажным тропическим — ТВ; с сухим тропическим — ТС; с сухим и с влажным тропическим — Т; для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение) — О. Двигатели, предназначенные для установки на морских судах в макроклиматических районах с умеренно-холодным морским климатом, имеют обозначение М, с тропическим морским — ТМ; для неограниченного района плавания — ОМ; двигатели, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море, — В.

В зависимости от условий размещения ГОСТ предусматривает различные исполнения электрических двигателей, которым также присваиваются оп-

ределенные обозначения. Двигатели, которые могут эксплуатироваться на открытом воздухе, имеют обозначение 1; в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от наружного воздуха,— 2; в закрытых помещениях, в которых колебания температуры и влажности, а также воздействие песка и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе, — 3; в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых помещениях) — 4; в помещениях с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и не-вентилируемых подземных помещениях) — 5. Например, двигатели, которые могут работать в районах с холодным климатом при установке на открытом воздухе, имеют обозначение ХЛ1; в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях — У3 или У4.

В зависимости от климатического исполнения машины и условий ее размещения соответственно изменяют конструкцию ее корпуса, применяют различные уплотнения, усиливают изоляцию обмоток и осуществляют другие конструктивные меры, обеспечивающие нормальную эксплуатацию машины в течение установленного срока.

Способ охлаждения. Для предотвращения чрезмерного нагрева частей машины (теплота, выделяющаяся в ней, зависит от значения потерь мощности) применяют различные способы охлаждения электрических машин. Способ охлаждения зависит от вида исполнения машины и ее мощности. При повышении мощности электрической машины требуется увеличивать интенсивность ее охлаждения.

Электрические микромашины обычно не имеют искусственного охлаждения. Отвод теплоты от нагретых частей (обмоток, ротора, статора, коллектора) осуществляется у них за счет естественной теплоотдачи окружающей среде (машины с естественным охлаждением).

Вращающиеся электрические машины малой, средней и большой мощности выполняют с искусственным охлаждением. В этих машинах с помощью специальных приспособлений достигается увеличение скорости движения ох-

лаждающей среды. Для большинства электрических машин охлаждающей средой служит воздух, но иногда для этой цели применяют водород. Такие машины называют *вентилируемыми*. Вентилируемые машины, у которых охлаждающий воздух или иной газ проходит через внутреннее пространство машины, называют *продуваемыми*; если же они обдувают только наружную поверхность машины — *обдуваемыми*.

Обозначение способов охлаждения состоит из букв IC (International Cooling) и двух цифр: первая (от 0 до 6) условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая (от 0 до 7) — способ его перемещения.

Вращающиеся электрические машины малой и средней мощности обычно выполняют с самовентиляцией. В этом случае охлаждение нагретых частей осуществляется вентилятором, который насаживают на вал ротора. В некоторых машинах вентиляторами являются вентиляционные лопасти или другие приспособления, пристраиваемые к торцовой части сердечника ротора.

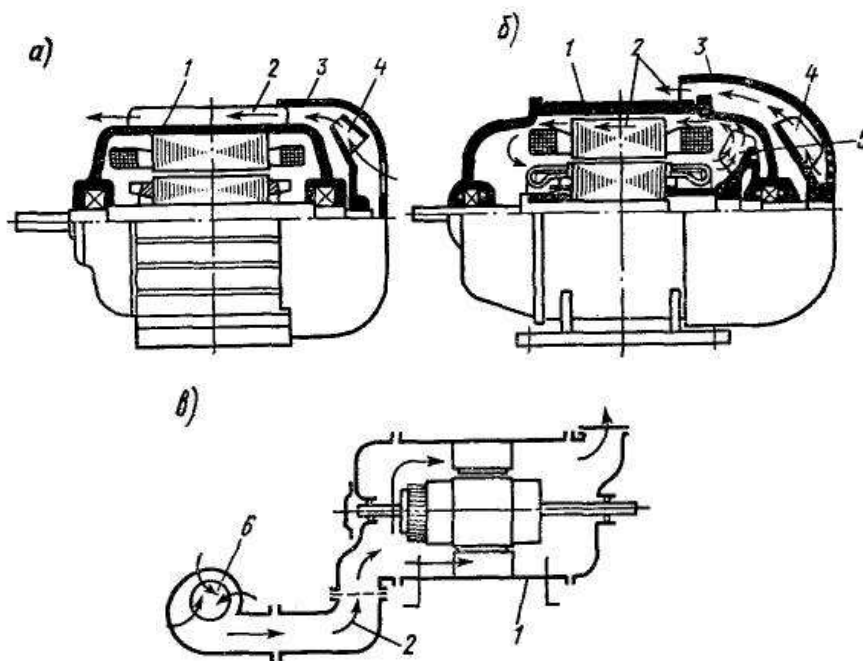


Рис. 1.4 - Способы вентиляции закрытых электрических машин:

1 — корпус машины; 2 — потоки охлаждающего воздуха; 3 — кожух; 4 — наружный вентилятор; 5 — внутренний вентилятор; 6 — вспомогательный вентилятор

Машины закрытого исполнения обычно выполняют обдуваемыми (рис. 1.4, а). В таких машинах вентилятор обдувает внешнюю поверхность корпуса, способствуя более интенсивному отводу от него теплоты (IC01).

Для увеличения поверхности охлаждения станины закрытых машин обычно снабжают наружными охлаждающими ребрами. Иногда на валу ротора устанавливают также внутренний вентилятор (рис. 1.4, б), обеспечивающий дополнительную циркуляцию воздуха внутри машины и усиление интенсивности теплообмена между ее закрытыми частями и станиной. В закрытых машинах большой мощности часто применяют независимую вентиляцию, при которой охлаждающий воздух прогоняется через машину вспомогательным вентилятором (рис. 1.4, в), приводимым во вращение отдельным электродвигателем (IC17). В электрических машинах, применяемых в авиации, вместо вентилятора для продува охлаждающего воздуха через машину используется аэродинамический напор, возникающий при движении самолета.

В машинах открытого, защищенного, а также брызго-, капле- и водозащищенного исполнений охлаждающий воздух обычно прогоняется вентилятором вокруг обмоток и по вентиляционным каналам, имеющимся в статоре, роторе и коллекторе.

Система вентиляции может быть осевой и радиальной. В случае осевой системы (рис. 1.5, а) охлаждающий воздух проходит через машину в направлении оси вала, в случае радиальной (рис. 1.5, б) — в радиальном направлении. В зависимости от места установки вентилятора осевая система вентиляции может быть вытяжной или нагнетательной. При вытяжной системе (рис. 1.6, а) вентилятор устанавливают в месте выхода воздушного потока из машины; при нагнетательной (рис. 1.6, б) - в месте входа его в машину.

В некоторых случаях применяют комбинированную радиально-осевую систему вентиляции.

В качестве охлаждающего агента в машинах большой мощности иногда применяют водород. Использование водорода позволяет уменьшить потери мощности, вызываемые трением между частями машины и потоком охлаждающего газа, и улучшить отвод теплоты, так как водород имеет меньшую плотность и большую теплопроводность, чем воздух. В машинах, в которых требуется обеспечить высокую интенсивность охлаждения, применяют жидко-

стное охлаждение, используя для этой цели трансформаторное масло, дистиллированную воду, керосин и т. п.

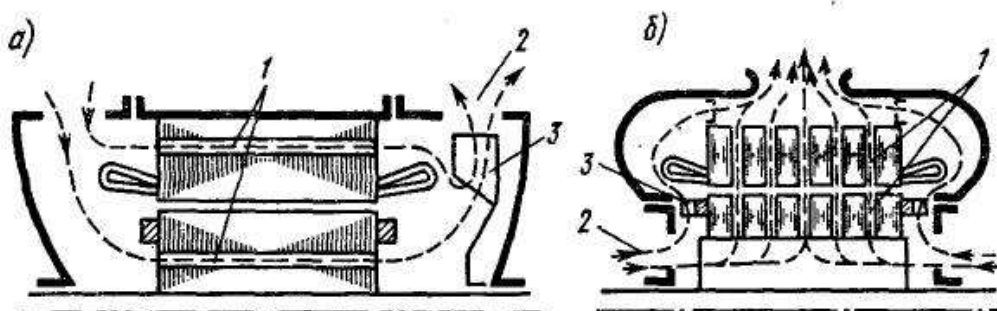


Рис. 1.5 - Осевая и радиальная системы вентиляции открытых и защищенных электрических машин:

1 — вентиляционные каналы; 2 — потоки охлаждающего воздуха; 3 — вентилятор

В машинах с жидкостным охлаждением охлаждающую жидкость (трансформаторное масло, дистиллированную воду) обычно пропускают непосредственно через полые проводники, обмотки ротора и статора или по специально охлаждающим каналам, выполненным в виде встроенных в обмотку тонкостенных коробок из немагнитного материала. Если охлаждение осуществляют за счет испарения жидкости, то систему охлаждения называют *испарительной*. В одной машине могут быть применены одновременно несколько охлаждающих агентов, например водородное охлаждение ротора и водяное охлаждение статора.

Электрические машины большой мощности обычно имеют замкнутую систему вентиляции с охлаждением нагретого воздуха, водорода, воды или масла в специальных теплообменниках (охладителях), охлаждаемых водой или воздухом. Иногда охладитель встраивают непосредственно в машину.

В трансформаторах требуемая интенсивность охлаждения также зависит от мощности. Трансформаторы малой мощности выполняют с естественным воздушным охлаждением; их называют *сухими трансформаторами*. Трансформаторы средней и большой мощности имеют обычно жидкостное охлаждение, при котором сердечник и обмотки помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом или негорючим жидким диэлектриком.

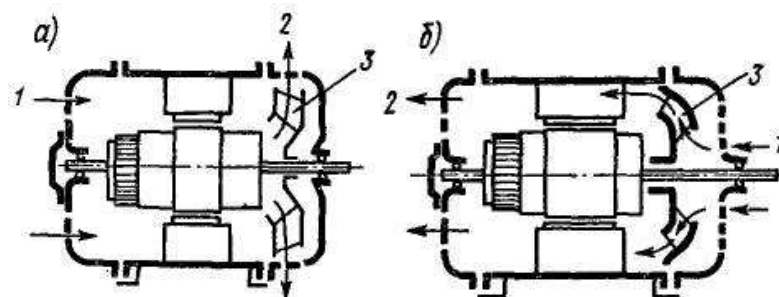


Рис. 1.6 - Вытяжная и нагнетательная системы вентиляции:
1 - входящий воздух; 2 — выходящий воздух; 3 - вентилятор

Установка и крепление. Для установки и крепления машины в ее конструкции предусматривают лапы на станине (рис. 1.7, а) и фланцы на подшипниковом щите или на станине (рис. 1.7, б).

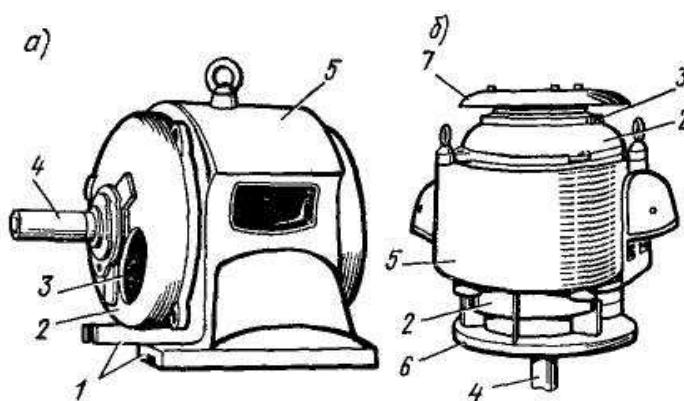


Рис. 1.7 - Общий вид электрических машин:
а — с креплением с помощью лап; б - с фланцевым креплением и вертикальным расположением вала; 1 — лапы для крепления; 2 — подшипниковый щит; 3 — вентиляционные окна для входа охлаждающего воздуха; 4 — вал; 5 — станина; 6 — фланец; 7 — крышка

В зависимости от способа установки и крепления, направления оси вала и конструкции подшипниковых узлов, электрические машины, согласно стандарту СЭВ, разделяют на девять конструктивных групп. Каждая из них подразделяется на виды, состоящие из нескольких форм исполнения. Всем им присвоены соответствующие обозначения, которые содержат буквы IM (International Mountning) и четыре цифры: первая определяет конструктивную группу, вторая и третья — способ монтажа, четвертая (от 0 до 8) — форму конца вала.

Имеются следующие конструктивные группы: IM1 — машина на лапах с

подшипниковыми щитами; IM2 — на лапах с подшипниковыми щитами и фланцем на одном щите; IM3 — без лап с подшипниковыми щитами и фланцем на одном щите; IM4 — без лап с подшипниковыми щитами и фланцем на станине; IM5 — без подшипников; IM6 — с подшипниковыми щитами и стоячковыми подшипниками; IM7 — со стоячковыми подшипниками (без щитов); IM8 — с вертикальным валом (не охватываемые группами IM1 — IM4); IM9 — специальное исполнение. В табл. 1.1 приведены некоторые примеры конструктивных форм исполнения электрических машин.

Концы валов электрических машин имеют стандартные размеры. Стандарты устанавливают строго фиксированные высоты осей вращения электрических машин, а также конструкции и размеры мест крепления.

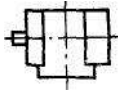
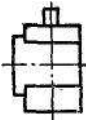
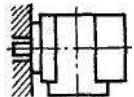
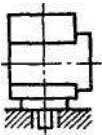
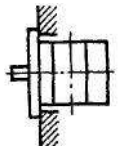
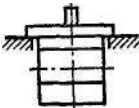
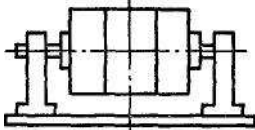
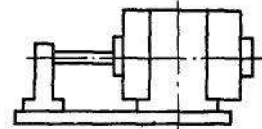
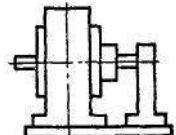
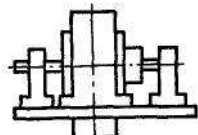
Виброакустические условия. При проектировании и изготовлении электрических машин во многих случаях применяют специальные конструктивные меры для уменьшения шума.

В электрических машинах шумы возникают по механическим, вентиляционным и магнитным причинам.

Механические шумы возникают из-за вибрации отдельных частей машины вследствие неточной балансировки ротора, трения щеток о коллектор, трения в подшипниках и др. Для снижения механического шума осуществляют точную динамическую балансировку ротора, увеличивают жесткость вала, применяют высококачественные подшипники, тщательно притирают щетки, повышают жесткость щеткодержателей и выполняют коллектор со строго цилиндрической и гладкой поверхностями.

Вентиляционные шумы обусловлены колебаниями давления воздушного потока, охлаждающего машину, и вихрями на отдельных участках системы охлаждения. Снижение вентиляционного шума достигается рациональной конструкцией вентилятора и всей системы охлаждения, повышением жесткости вентилятора, тщательной его балансировкой и установлением достаточно большого зазора между вентилятором и подшипниковым щитом.

Таблица 1.1

Вид машины	Формы исполнения	
На лапах с подшипниковыми щитами (группа IM1)	<i>IM1001</i> 	<i>IM1031</i> 
На лапах с двумя подшипниковыми щитами с фланцем на подшипниковом щите (группа IM2)	<i>IM2101</i> 	<i>IM2111</i> 
Без лап с подшипниковыми щитами с фланцем на одном подшипниковом щите (группа IM3)	<i>IM3I01</i> 	<i>M3131</i> 
На лапах с подшипниковыми щитами и стоячковыми подшипниками (группа IM6)	<i>IM6010</i>  <i>IM6811</i> 	
На лапах со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов) (группа IM7)	<i>IM7011</i> 	<i>IM7311</i> 

Магнитные шумы появляются из-за вибрации отдельных частей магнитной системы электрической машины под действием переменных электромагнитных сил, возникающих в результате изменения магнитной проводимости воздушного зазора при вращении зубчатого якоря, явления магнитострикции, а в машинах переменного тока и трансформаторах — вследствие периодиче-

ского перемагничивания магнитопровода.

Уменьшение шума достигается рациональным выбором числа зубцов ротора и статора, созданием эксцентрического воздушного зазора (в машинах постоянного тока), скосом зубцов ротора, применением полужакрытых пазов и др.

Допускаемые уровни шума электрических машин строго нормированы. Для оценки шума принят средний (для нескольких точек) уровень звука A , измеренный на расстоянии $d = 1$ м от контура машины (обозначается L_{d1A}), а для некоторых машин специального исполнения — также и средний уровень звука A , измеренный на опорном радиусе 3 м (обозначается L_{A3}). Уровень звука (дБ) определяется отношением

$$A = 20 \cdot \lg(p/p_0),$$

где p — звуковое давление в данной точке. Па, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — звуковое давление, соответствующее порогу слышимости.

В зависимости от требований, предъявляемых к уровню шума, электрические машины подразделяют на следующие классы: 0; 1; 2; 3; 4. Так, например, для машин класса 1 уровень звука L_{d1A} в режиме холостого хода не должен превышать 64 — 109 дБ, а уровень звука L_{A3} — не должен превышать 55 — 104 дБ.

К классу 0 относят машины, работающие в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, с принудительной вентиляцией от постороннего вентилятора, облегченной массы, многополюсные с числом полюсов более 12, некоторые типы однофазных и индукторных генераторов, сварочные генераторы и преобразователи, многоскоростные асинхронные двигатели, двигатели с повышенным пусковым моментом и повышенным скольжением и пр.; к классу 1 — машины постоянного тока, асинхронные, синхронные и коллекторные машины нормального исполнения; к классу 2 — машины с малошумными подшипниками, со специальными малошумными вентиляторами и т. п.; к классу 3 — машины с пониженным использованием активных материалов, закрытые, с глушителями вентиляционного шума; к классу 4 — машины с зву-

коизолирующим кожухом или другими специальными конструктивными узлами, обеспечивающими снижение шума.

Снижение радиопомех. Коллекторные машины постоянного и переменного тока являются интенсивными источниками радиопомех. Возникающее в этих машинах искрение под щетками создает импульсные колебания тока и напряжения, имеющие непрерывный частотный спектр. В результате этого образуются помехи радиоприему в виде резкого треска или непрерывного шума во всем диапазоне частот, принятых для радиосвязи.

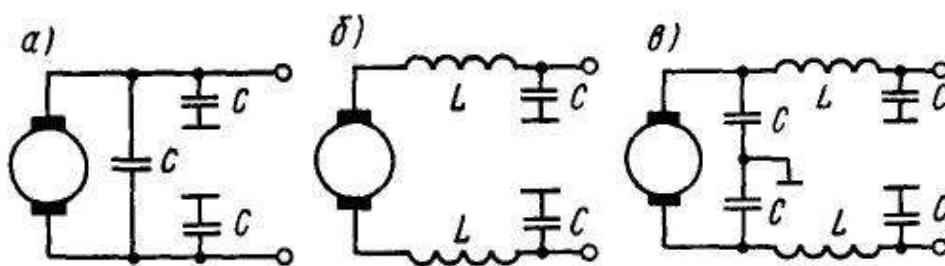


Рис. 1.8 - Схемы помехоподавляющих фильтров

Уровень помех, распространяемых по проводам и кабелям, присоединенным к электрической машине, определяют по измеренному на зажимах машины напряжению (в микровольтах). Уровень помех, излучаемых машиной в окружающее пространство, определяют по максимальному напряжению (в микровольтах), которое измеряют на одно-метровой штыревой антенне, установленной на определенном расстоянии от машины; эту величину называют *уровнем поля*. Уменьшения радиопомех достигают путем снижения степени искрения, экранирования самой машины, подводимых к ней проводов и применения помехоподавляющих фильтров, препятствующих распространению высокочастотных колебаний по проводам сети, к которой присоединена машина. Наиболее простыми помехоподавляющими фильтрами являются емкостные, представляющие собой конденсаторы C , включаемые между токопроводящими зажимами, а также между этими зажимами и корпусом машины (рис. 1.8, а). Наиболее эффективными являются проходные конденсаторы, у которых один выводной конец присоединяют к корпусу, а другой проходит

внутри конденсатора и является токоведущим проводником, присоединяемым к выходному зажиму машины. В ряде случаев применяют более сложные фильтры — Г-образный (рис. 1.8, б) и П-образный (рис. 1.8, в), состоящие из индуктивности L и емкости C . Такие фильтры пропускают во внешнюю цепь только постоянную составляющую тока и сильно ослабляют гармонические составляющие, создающие радиопомехи. Емкость помехоподавляющего конденсатора обычно подбирают опытным путем; она составляет 0,1 — 1 мкФ, а индуктивность дросселя фильтра — 50 — 500 мкГн.

1.5 Электротехнические материалы, применяемые в электрических машинах

Эксплуатационные свойства и надежность электрической машины во многом определяются технологией изготовления и качеством применяемых материалов. В электромашиностроении применяют различные магнитные, проводниковые и изоляционные материалы.

Магнитные материалы. Магнитопроводы электрических машин изготавливают из листовой электротехнической стали, стального литья и листовой углеродистой стали.

В зависимости от структурного состояния и способа прокатки электротехнические стали делят на горячекатаные и холоднокатаные. Горячекатаная сталь имеет поликристаллическую структуру, в которой кристаллы, имеющие форму куба, расположены хаотично, что приводит к практической изотропности свойств стали. Холоднокатаная сталь в результате холодной прокатки и отжига получает специальную структуру, при которой кристаллы ориентированы в определенном направлении.

Различают сталь с ребровой структурой, когда кристаллы ориентированы ребром куба кристалла вдоль направления проката, и сталь с кубической структурой — при ориентации кристаллов стороной куба. Сталь с ребровой

структурой обладает ярко выраженной магнитной анизотропией. При этом вдоль направления проката обеспечивается наименьшее магнитное сопротивление, а в поперечном направлении или под углом к направлению прокатки — наибольшее. Поэтому при изготовлении магнитопроводов из такой стали необходимо, чтобы направление магнитного потока на всем его пути совпадало с направлением проката. Сталь с кубической структурой изотропна, т. е. имеет одинаково высокие магнитные свойства как вдоль, так и поперек проката.

Электротехническую сталь изготавливают различной толщины и выпускают в листах и рулонах. При частоте 50 Гц применяют сталь толщиной 0,28; 0,30; 0,35 и 0,5 мм; при частоте 400 Гц - 0,1 и 0,2 мм. Для трансформаторов, работающих на частотах свыше 2,5 кГц, используют сталь толщиной до 0,05 мм.

Главной легирующей присадкой электротехнической стали является кремний, наличие которого уменьшает магнитные потери в стали. Содержание кремния в стали составляет 0,4 — 4,8 % и чем оно выше, тем ниже потери. Однако добавка кремния повышает твердость и хрупкость стали, что затрудняет ее обработку. Поэтому высоколегированную сталь (с содержанием кремния 2,8 — 3,8 % и выше) применяют при изготовлении трансформаторов и крупных вращающихся машин. Для изготовления магнитопроводов малых машин, у которых в роторе и на статоре должны быть выштампованы пазы сравнительно сложной конфигурации, применяют сталь с содержанием кремния 0,4-1,9%.

Электротехническую сталь поставляют на электромашиностроительные заводы в виде листов, рулонов или резаной ленты, в основном в термически обработанном состоянии с электроизоляционным нагревостойким или ненагревостойким покрытием, а также без покрытия. В качестве изоляции используется слой оксидной пленки толщиной 3 — 5 мкм или лаковой пленки толщиной 15 — 20 мкм.

Различные марки электротехнической стали обозначают четырехзначными числами (например, 1211; 2013; 2212; 3413; 3416 и т. п.). Первая цифра

означает принадлежность стали к тому или иному классу (1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой). Вторая цифра означает содержание кремния (от 0,4 до 4,8%); третья цифра — группа по основной нормируемой характеристике (удельным магнитным потерям при определенной индукции и частоте перемагничивания); четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

Для изготовления магнитопроводов современных асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 180 мм используют сталь марки 2013, при больших высотах вращения — марок 2212, 2312 и 2421. Статоры синхронных машин изготавливают из сталей тех же марок. Сталь 2013 обладает высокой магнитной проницаемостью и сравнительно низкими потерями на перемагничивание. После штамповки листы подвергают рекристаллизационному отжигу (для устранения ухудшения магнитных свойств стали в результате образования наклепа при технологических операциях) и оксидации для создания изоляционного слоя. Стали марок 2212, 2321 и 2411 имеют электроизоляционное покрытие и не требуют отжига. Применение этих сталей, имеющих низкие потери, повышает КПД и, кроме того, упрощает технологию изготовления, так как не требуется отжиг листов большого размера.

В машинах постоянного тока для сердечников якорей машин с высотой оси вращения до 200 мм применяют сталь марок 2013. Для снятия наклепа после штамповки сталь отжигают, а затем изолируют. При больших высотах вращения используют стали марок 2112, 2212, 2312, 2411.

При изготовлении магнитопроводов трансформаторов используют холоднокатаные анизотропные стали марок 3412 — 3413 с изоляционным покрытием; после штамповки сталь отжигают. Применение холоднокатаной анизотропной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек прокатки или, по крайней мере, уменьшить длину участков, где это необходимо. По тем же причинам во вращающихся электрических машинах из-за более сложной конфигурации их магнитопроводов такая сталь нахо-

дит ограниченное применение — только в очень крупных машинах для изготовления сегментов, из которых собирают сердечники статора и ротора (стали марок 3411 — 3413).

Полюсы машин постоянного тока и синхронных машин собирают из листов низкоуглеродистой конструкционной стали толщиной 1—2 мм или электротехнической стали 3411. Корпуса машин постоянного тока изготавливают путем сварки из листовой низколегированной магнитно-мягкой стали или стального литья, так как они являются частью магнитопровода. Стальное литье применяют также для изготовления станин и роторов синхронных машин. Валы машин выполняют из высокопрочных конструкционных сталей с добавкой хрома, никеля и т. п. Особенно сложно изготовить роторы турбогенераторов, в которых сталь одновременно должна обладать и высокой прочностью, и хорошей магнитной проницаемостью.

Проводниковые материалы. В электромашиностроении применяют медь и алюминий. Медь значительно дороже алюминия, однако ее используют для изготовления обмоток чаще, чем алюминий, так как она обладает более высокой электропроводностью (примерно в 1,6 раза), что позволяет сократить габариты машин. Для изготовления круглых и прямоугольных проводов обмоток электрических машин и трансформаторов применяют проводниковую медь высокой чистоты, получаемую в электролитических ваннах; она отличается весьма низким содержанием посторонних примесей (содержание меди 99,95 %).

Алюминиевые провода также применяют для изготовления обмоток вращающихся электрических машин, но только в том случае, когда эти обмотки имеют сравнительно малую тепловую нагрузку. Используют алюминий и для изготовления обмоток трансформаторов, где увеличение размера обмоток меньше влияет на увеличение габаритов и массы, чем во вращающихся электрических машинах.

В качестве токопроводящего материала контактных колец и коллектора

кроме меди применяют бронзу и даже сталь (для контактных колец), так как для этих деталей важна не только электропроводность, но и высокая механическая прочность.

Изоляционные материалы. Основные требования, предъявляемые к изоляции, — нагревостойкость, высокая электрическая прочность, влагостойкость, хорошая теплопроводность, высокая механическая прочность и эластичность.

Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины. Срок службы электрической машины составляет 15-20 лет. При нагреве изоляции возникают электрохимические и термические процессы, приводящие к ее старению, т. е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, в зависимости от нагревостойкости подразделяют на семь классов: Y, A, E, B, F, H, C, характеристики которых приведены в табл. 1.2.

К классу Y относят текстильные и бумажные материалы, изготовленные из хлопка, натурального шелка, целлюлозы и полиамидов (ленты, бумага, картон, фибра), древесину и пластмассы с органическими наполнителями.

В класс A входят материалы класса Y, пропитанные изоляционным составом или погруженные в жидкие диэлектрики (натуральные смолы, масляные, асфальтовые, эфирцеллюлозные лаки, трансформаторное масло, термопластичные компаунды); лакоткани, изоляционные ленты, лакобумаги, электрокартон, гетинакс, текстолит, пропитанное дерево, древесные слоистые пластики, некоторые синтетические пленки, изоляция проводов типа ПБД, ПЭВЛО, ПЭЛШО и другие из хлопчатобумажной ткани, шелка и лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭЛ, ПЭМ, ПЭЛР и ПЭВД и др.

Класс E составляют синтетические пленки и волокна, некоторые лакоткани на основе синтетических лаков, терморезистивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые), изоляция проводов типа ПЛД, ПЭПЛО из лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭВТЛ,

ПЭВТЛК и другие на основе полиуретановых и полиамидных смол.

Таблица 1.2

Класс изоляции	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Предельная допустимая температура при длительной работе, °С	80	105	120	130	155	180	Более 180

В класс В включают материалы на основе слюды (миканиты, микаленты, слюдиниты, слюдопласты), стекловолокна (стеклоткани, стеклолакоткани) асбестовые волокна (пряжа, бумага, ткани) с бумажной, тканевой или органической подложкой; пленкостеклопласт “Изофлекс”; пластмассы с неорганическим наполнителем; слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов; термореактивные синтетические компаунды; эмалевая изоляция проводов типа ПЭТВ, ПЭТВД и другие на основе полиэфирных лаков и термопластических смол. Пропитывающими составами служат битумно-масляносмоляные лаки на основе природных и синтетических смол.

Класс F содержит материалы, указанные в классе В, — из слюды, стекловолокна, асбеста, но без подложки или с неорганической подложкой; пленкостеклопласт “Имидсфлекс”, стекло-волокнистую и асбестовую изоляцию проводов типа ПСД, ПСДТ, а также эмалевую изоляцию проводов типа ПЭТ-155, ПЭТП-155, ПЭД на основе капрона. Пропитывающими составами служат термостойкие синтетические лаки и смолы.

Класс Н — это указанные в классе В материалы из слюды, стекловолокна и асбеста без подложки или с неорганической подложкой, кремний-органические эластомеры, стекло-волокнистая и асбестовая изоляция проводов типа ПСДК, ПСДКТ, эмалевая изоляция проводов типа ПЭТ-200, ПЭТП-200 и другие на основе кремний-органических лаков; пропитывающими составами служат кремний-органические лаки и смолы.

Класс С — слюда, стекло, стекло-волокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц, шифер, асбестоцемент, материалы из слюды без подложки или со стекло-волокнистой подложкой, полиамидные и полифтор-

этиленовые пленки. Связующим составом служат кремний-органические и элементоорганические лаки и смолы.

В настоящее время электрические машины с изоляцией класса А практически не изготавливают, а с изоляцией класса Е находят ограниченное применение — главным образом в машинах небольшой мощности. Применяют в основном изоляцию классов В и F, а в специальных машинах, работающих в тяжелых условиях (металлургия, горное оборудование, транспорт), — класса Н. В результате использования более нагревостойких материалов, улучшения свойств электротехнических сталей и улучшения конструкций за последние 60 — 70 лет удалось уменьшить массу электрических машин в 2,5 — 3 раза.

Наибольшей нагревостойкостью обладают стекло-волоконистые и слюдяные материалы, содержащие кремний-органические связующие и пропитывающие составы, эмалевая изоляция проводов на основе кремний-органических лаков и синтетические пленки типа “Изофлекс”, “Имидофлекс” и др. Они отличаются также высокой электрической и механической прочностью и влагостойкостью.

В электрических машинах широко используют обмоточные провода с эмалевой, волокнистой и комбинированной изоляцией. Класс нагревостойкости такой изоляции зависит от химического состава эмалевого лака, рода волокнистого материала и подклеивающего состава. В машинах постоянного тока средней и большой мощности используют литую изоляцию типа “монолит”. Изоляция представляет собой сочетание стеклоткани и слюдинита с термореактивным компаундом, который вводят в обмотку и изоляцию под вакуумом с последующей опрессовкой. Подобного же рода изоляцию с термореактивным компаундом применяют и в машинах переменного тока. В настоящее время стоимость изоляции составляет 30-70% от стоимости всех материалов, идущих на изготовление электрической машины.

В трансформаторах с масляным охлаждением широко используют провода с изоляцией класса А; применение в них изоляционных материалов с большой нагревостойкостью нецелесообразно, так как допустимая температу-

ра обмоток определяется температурой трансформаторного масла (105 °С), относящегося к классу А. В трансформаторах с воздушным охлаждением широко используют обмоточные провода более высоких классов нагревостойкости В, Е.

В электрических машинах различают межвитковую и корпусную изоляцию. *Межвитковая изоляция* (между витками обмотки) обеспечивается изоляцией самого проводника, наносимой на него в процессе изготовления на кабельных заводах или при изготовлении электрической машины. *Корпусная изоляция* отделяет проводники обмотки от корпуса электрической машины. Для нее используют различные прокладки, гильзы или ряд слоев изоляции, наносимой на соответствующую катушку до установки ее в машину.

Электрические щетки⁵. Электрический контакт со скользящими поверхностями (контактными кольцами и коллектором) осуществляется с помощью щеток, представляющих собой прямоугольные бруски сложного состава, выполненные на графитовой основе. Многочисленные типы щеток различают по твердости, коэффициенту трения и падению напряжения под щетками. Обычно щетки подбирают экспериментально. Основные правила, которыми руководствуются при выборе щеток, следующие:

- 1) для быстроходных машин постоянного тока применяют мягкие щетки со средним значением падения напряжения под ними (1,5-2,0 В);
- 2) для машин постоянного тока с затрудненной коммутацией — твердые щетки с повышенным падением напряжения под ними (2,4-3,5 В);
- 3) для контактных колец — металлографитные щетки с малым падением напряжения (0,1-0,5 В).

⁵ Старое название, оставшееся со времен начала развития машин, когда электрический контакт со скользящими поверхностями осуществлялся проволоочными щетками

2 ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1 Назначение и области применения трансформаторов

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или больше индуктивно связанных обмоток. Оно предназначено для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

С помощью трансформаторов повышается или понижается напряжение, изменяется число фаз, а в некоторых случаях преобразуется частота переменного тока. Возможность передачи электрических сигналов от одной обмотки к другой посредством взаимной индукции была открыта *М. Фарадеем* в 1831 г.; при изменении тока в одной из обмоток, намотанной на стальной магнитопровод, в другой обмотке индуцировалась ЭДС. Однако первый практически работающий трансформатор создал известный изобретатель *П. Н. Яблочков* в содружестве с *И. Ф. Усагиным* в 1876 г. Это был двухобмоточный трансформатор с разомкнутым магнитопроводом.

В дальнейшем несколько конструкций однофазных трансформаторов с замкнутым магнитопроводом были созданы венгерскими электротехниками *О. Блати*, *М. Дери* и *К. Циперновским*. Для развития трансформаторостроения и вообще электромашиностроения большое значение имели работы проф. *А. Г. Столетова* по исследованию магнитных свойств стали и расчету магнитных цепей.

Важная роль в развитии электротехники принадлежит *М. О. Доливо-Добровольскому*. Он разработал основы теории многофазных и, в частности, трехфазных переменных токов и создал первые трехфазные электрические машины и трансформаторы. Трехфазный трансформатор современной формы с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости, был изобретен им в 1891 г. С тех пор происходило дальнейшее конструктивное усовершенствование трансформаторов, уменьшалась их масса и габариты, повы-

шалась экономичность. Основные положения теории трансформаторов были разработаны в трудах *Е. Арнольда* и *М. Видмара*.

В развитии теории трансформаторов и совершенствовании их конструкции большое значение имели работы ученых советского времени *В.В. Корицкого*, *Л.М. Пиотровского*, *Г.Н. Петрова*, *А.В. Сапожникова*, *А.В. Трамбицкого* и др.

Трансформаторы широко используют для следующих целей.

1. Для передачи и распределения электрической энергии. Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6 — 24 кВ. Передавать же электроэнергию на большие расстояния выгодно при больших напряжениях, поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, повышающие напряжение.

В настоящее время для высоковольтных линий электропередачи применяют силовые трансформаторы с масляным охлаждением напряжением 330, 500 и 750 кВ, мощностью до 1200—1600 кВ·А. В связи с наличием дальних линий электропередачи напряжением 1150 кВ переменного тока, в электропромышленности используются трансформаторные группы, состоящие из трех однофазных трансформаторов мощностью 667 МВ·А, а для линий 1500 В постоянного тока — двенадцатифазные преобразовательные блоки с четырехобмоточными трансформаторами общей мощностью 1500 МВ·А. КПД таких трансформаторов составляет 98 — 99 % и выше.

Для перспективных линий электропередачи переменного тока напряжением 1800 — 2000 кВ и постоянного тока напряжением 3000 кВ разрабатывают трансформаторы мощностью 1320 МВ·А на одну фазу.

Электрическая энергия распределяется между промышленными предприятиями и населенными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий по воздушным и кабельным линиям при напряжении 220, 110, 35, 20, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение. Кроме того, понижающие трансформаторы следует устанавли-

вать в пунктах потребления электроэнергии, так как большинство электрических потребителей переменного тока работает при напряжениях 220, 380 и 660 В. Таким образом, электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителям подвергается в трансформаторах многократному преобразованию (3 — 5 раз). Применяемые для этих целей трансформаторы могут быть одно- и трехфазными, двух- и трехобмоточными.

2. Для обеспечения нужной схемы включения вентиля в преобразовательных устройствах и согласования напряжений на входе и выходе преобразователя. В вентильных преобразователях, выпрямляющих переменный ток или преобразующих его из постоянного в переменный (инверторы), отношение напряжений на входе и выходе зависит от схемы включения вентиля. Поэтому если на вход преобразователя подается стандартное напряжение, то на выходе получается нестандартное. Для устранения этого недостатка вентильные преобразователи, как правило, снабжают трансформаторами, обеспечивающими стандартное выходное напряжение при принятой схеме включения вентиля. Кроме того, ряд схем включения вентиля требует обязательного применения трансформатора. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют *преобразовательными*. Их мощность достигает тысяч киловольт-ампер, напряжение 110 кВ; они работают при частоте 50 Гц и более. Рассматриваемые трансформаторы выполняют одно-, трех- и многофазными с регулированием выходного напряжения в широких пределах и без регулирования.

Для возбуждения мощных турбо-и гидрогенераторов, электропривода и других целей все шире применяют трансформаторы с естественным воздушным охлаждением напряжением 3 — 24 кВ и мощностью 133 — 6300 кВ·А. Благодаря использованию в этих трансформаторах новой теплостойкой изоляции удастся повысить их нагрузочную способность и в 1,3 — 1,5 раза сократить массо-габаритные показатели по сравнению с применявшимися ранее трансформаторами с масляным охлаждением.

3. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электротермических установок (электродные трансформаторы),

торы) и др. Мощность их достигает десятков тысяч киловольт-ампер при напряжении до 10 кВ; они работают обычно при частоте 50 Гц.

4. Для питания различных цепей радио- и телевизионной аппаратуры; устройств связи, автоматики и телемеханики, электробытовых приборов; для разделения электрических цепей различных элементов этих устройств; для согласования напряжений и т. п. Трансформаторы, используемые в этих устройствах, обычно имеют малую мощность (от нескольких вольт-ампер до нескольких киловольт-ампер), невысокое напряжение, работают при частоте 50 Гц и более. Их выполняют двух-, трех- и многообмоточными; условия работы, предъявляемые к ним требования и принципы проектирования весьма специфичны.

5. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов, например реле, в электрические цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют *измерительными*. Они имеют сравнительно небольшую мощность, определяемую мощностью, потребляемой электроизмерительными приборами, реле и др.

Трансформаторы, перечисленные в п. 1, 2, 3 и частично в п. 4, предназначенные для преобразования электрической энергии в сетях энергосистем и потребителей электрической энергии, называют *силовыми*. Для режима их работы характерны неизменная частота переменного тока и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений.

Силовые трансформаторы, выпускаемые отечественными заводами, разделены на несколько групп (габаритов) от I до VIII. Например, трансформаторы мощностью до 100 кВ·А включительно относят к габариту I, от 160 до 630 кВ·А — к габариту II, от 1000 до 6300 кВ·А — к габариту III и т. п.

В данной главе в основном рассматривается теория силовых трансформаторов; другие же виды трансформаторов рассмотрены кратко на основе общей теории.

2.2 Принцип действия трансформатора

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток (рис. 2.1), размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т. е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины. Первичную обмотку 1 подключают к источнику переменного тока — электрической сети с напряжением u_1 . Ко вторичной обмотке 2 присоединяют сопротивление нагрузки Z_H .

Обмотку более высокого напряжения называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН), а низкого напряжения — *обмоткой низшего напряжения* (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами *A* и *X*; обмотки НН — буквами *a* и *x*.

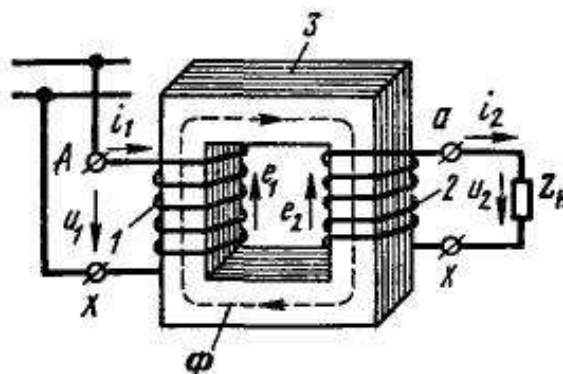


Рис. 2.1 - Электромагнитная система однофазного трансформатора :
1,2 - первичная и вторичная обмотки; 3 — магнитопровод

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 , который создает переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток Φ индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС — e_1 и e_2 , пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков w_1 и w_2 соответствующей обмотки и скорости изменения потока $d\Phi/dt$.

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке,

$$e_1 = - w_1 d\Phi/dt; e_2 = - w_2 d\Phi/dt.$$

Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках

определяется выражением

$$E_1/E_2 = e_1/e_2 = w_1/w_2. \quad (2.1)$$

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3 — 5 % от номинальных значений напряжений U_1 и U_2 , и считать $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, то получим

$$U_1/U_2 \approx \varpi_1/\varpi_2 \quad (2.2)$$

Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении U_1 можно получить желаемое напряжение U_2 . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков w_2 берут больше числа w_1 ; такой трансформатор называют *повышающим*. Если требуется уменьшить напряжение U_2 , то число витков w_2 берут меньшим w_1 ; такой трансформатор называют *понижающим*.

Отношение ЭДС $E_{вн}$ обмотки высшего напряжения к ЭДС $E_{нн}$ обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*

$$k = E_{вн}/E_{нн} = \varpi_{вн}/\varpi_{нн} \quad (2.3)$$

Коэффициент k всегда больше единицы.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики — многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число изолированных друг от друга обмоток, что дает возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений (U_2 , U_3 , U_4 и т. д.) для электропитания двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжений.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остается приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за

внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \varpi_1 / \varpi_2 \quad (2.4)$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в k раз по сравнению с первичным, ток i_2 во вторичной обмотке соответственно уменьшается в k раз.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока.

Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнитопроводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а следовательно, не передается электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС E_1 в первичной обмотке ток $I_1 = U_1/R_1$ весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать нагрузочное сопротивление. Если к источнику переменного тока подключить сопротивление R через трансформатор с коэффициентом трансформации k , то для цепи источника

$$R' = \frac{P_1}{I_1^2} \approx \frac{P_2}{I_1^2} \approx \frac{I_2^2 R}{I_1^2} \approx k^2 R, \quad (2.5)$$

где P_1 — мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт; $P_2 = I_2^2 R \approx P_1$ — мощность, потребляемая сопротивлением R от трансформатора.

Таким образом, *трансформатор изменяет значение сопротивления R в k^2 раз*. Это свойство широко используют при разработке различных электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

2.3 Устройство трансформаторов

Магнитная система. В зависимости от конфигурации магнитной системы трансформаторы подразделяют на *стержневые* (рис. 2.2, а), *броневые* (рис. 2.2, б) и *тороидальные* (рис. 2.2, в). *Стержнем* называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют *ярмом*. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

Силовые трансформаторы большой мощности броневого типа отечественная промышленность не выпускает. Но при значительных мощностях (более 80-100 МВ·А на фазу) часто применяют *бронестержневые* трансформаторы, у которых крайние стержни имеют боковые ярма (рис. 2.3, а). Такая конструкция позволяет уменьшить поперечное сечение верхнего и нижнего ярм по сравнению со стержневыми трансформаторами, в результате чего уменьшается высота трансформатора и упрощается его транспортировка по железным дорогам. При дальнейшем повышении мощности для еще большего уменьшения высоты верхнего и нижнего ярм применяют трансформаторы *многостержневой конструкции*. В этом случае “расщепляют мощность” каждой фазы между двумя или тремя отдельными стержнями, т. е. обмотки каждой фазы располагают на нескольких стержнях, включенных в магнитном отношении параллельно (рис. 2.3, б).

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов (рис. 2.4) собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28 — 0,5 мм при частоте 50 Гц. Обычно применяют анизотропную холоднокатаную сталь с ребровой структурой (марки 3412-3416) и содержанием кремния 2,8 — 3,8 %. Магнитные свойства этой стали резко улучшаются при совпадении направлений магнитного потока и прокатки: потери в стали на перемагничивание уменьшаются в два-три раза, а магнитная проницаемость и индукция насыщения возрастают.

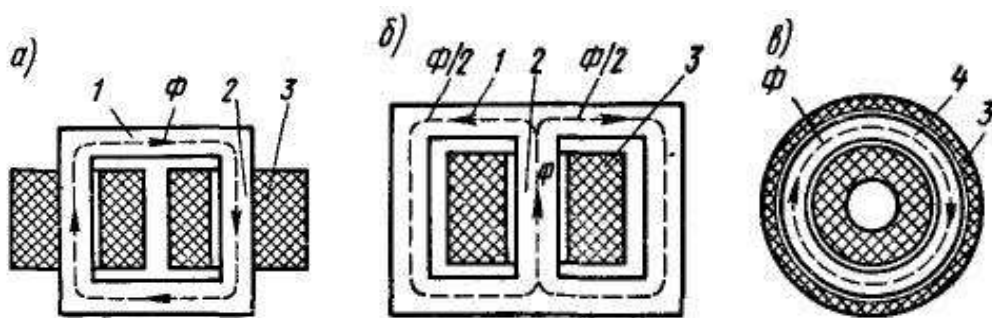


Рис. 2.2 - Основные типы однофазных трансформаторов:

1 — ярмо; 2 — стержень; 3 — обмотки; 4 — тороидальный магнитопровод

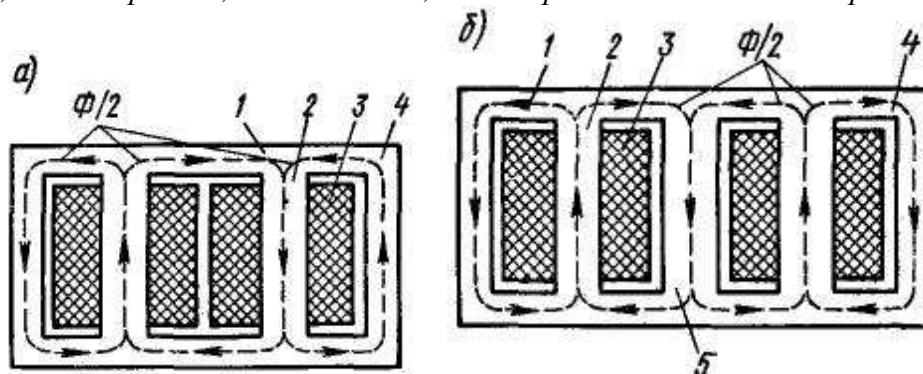


Рис. 2.3 - Однофазные трансформаторы большой мощности: а - бронестержневой; б - многостержневой; 1 — верхнее ярмо; 2 — стержень; 3 — обмотки; 4 — боковое ярмо; 5 — боковое совмещенное ярмо

Однако использование холоднокатаной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек направления прокатки или по крайней мере уменьшить длину участков, на которых это явление возникает.

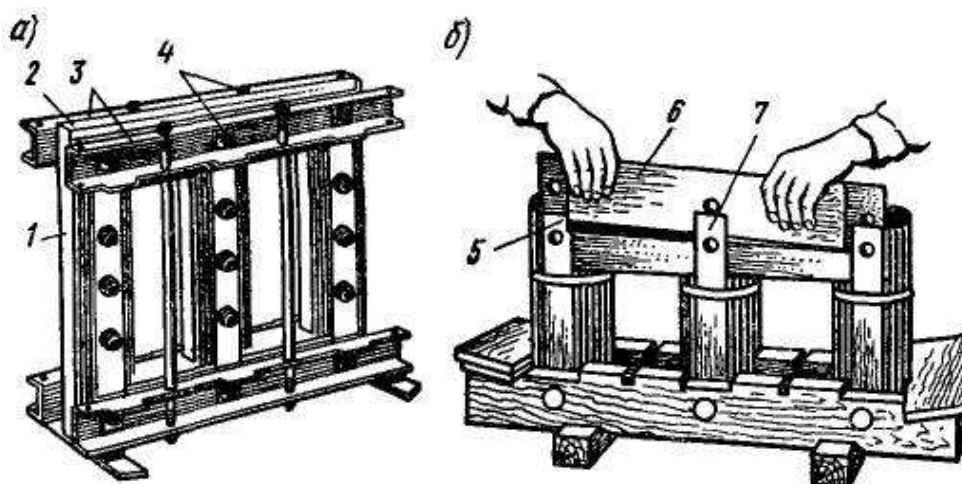


Рис. 2.4 - Магнитная система силового трехфазного трансформатора:

а — общий вид; б — сборка магнитопровода; 1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — опорные балки; 4 — стяжные шпильки; 5, 7 - листы крайнего и среднего стержней; 6 — листы верхнего ярма

По способу сборки различают стыковые и шихтованные магнитопроводы. В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают и скрепляют раздельно, а затем устанавливают в стык и соединяют между собой. В месте стыка во избежание замыкания листов устанавливают изоляционные прокладки. В шихтованных магнитопроводах ярма и стержни собирают как цельную конструкцию с взаимным перекрытием отдельных слоев в месте стыка (“впереплет”). Каждый слой состоит из двух-трех листов. При сборке магнитопровода листы в двух смежных слоях располагают, как показано на рис. 2.5, а и б, т. е. листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. После сборки магнитопровода листы верхнего ярма вынимают, на стержни устанавливают катушки и ярмо снова ставят на место (рис. 2.4, б). Шихтованные магнитопроводы имеют значительно меньшее магнитное сопротивление, чем стыковые; поэтому последние применяют сейчас только в микротрансформаторах.

При изготовлении магнитопроводов из холоднокатаной текстурованной стали листы в местах сочленения крайних стержней с ярмами скашивают примерно на 45° (рис. 2.5, в и г).

Скос листов позволяет уменьшить магнитное сопротивление магнитопровода и потери мощности в нем, так как при прямоугольной форме листов в местах поворота магнитного потока на 90° возникают добавочные потери из-за несовпадения направлений индукционных линий и прокатки стали. Сборка магнитопроводов из листов с косым стыком является весьма трудоемкой, так как в целях перекрытия стыков листов при шихтовке приходится смещать их по длине. Поэтому в силовых трансформаторах широко применяют комбинированный способ шихтовки, при котором стыки листов ярма со средним стержнем (рис. 2.5, д и е) делают прямыми, а с крайними стержнями — косыми, или первый слой листов выполняют с косыми стыками, а второй — с пря-

мыми.

Стержни магнитопровода в силовых трансформаторах сравнительно небольшой мощности имеют прямоугольное или крестовидное сечение (рис. 2.6, а и б), а в более мощных — ступенчатое, по форме приближающееся к кругу (рис. 2.6, в) (их собирают из листов различной ширины). Такая форма обеспечивает получение требуемого поперечного сечения стержня при минимальном диаметре, что позволяет уменьшить длину витков обмоток, а следовательно, и расход обмоточных проводов.

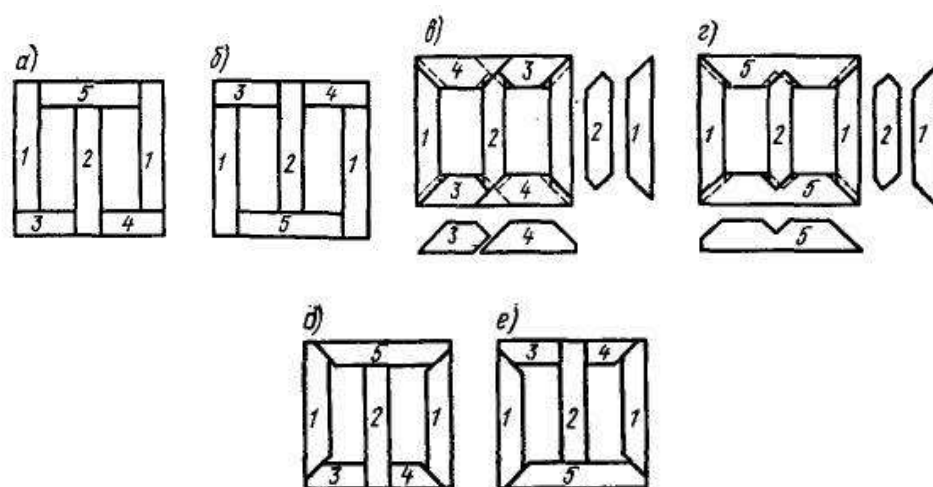


Рис. 2.5 - Расположение листов в двух смежных слоях магнитопровода силового трехфазного трансформатора: а, в, е — 1, 3, 5-й и другие слои; б, г, д — 4, 2, 6-й и другие слои; 1 - листы крайних стержней; 2 — листы среднего стержня; 3, 4, 5 — листы верхнего и нижнего ярм

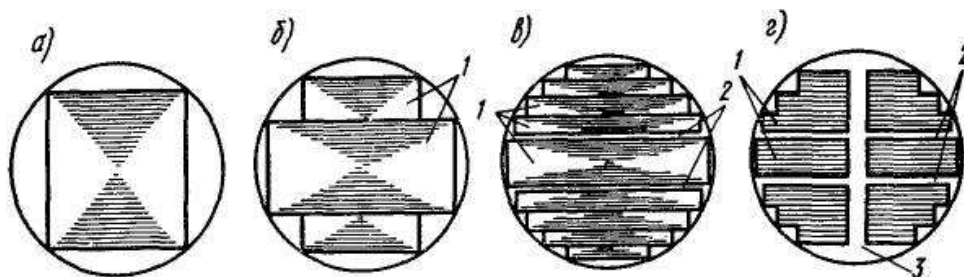


Рис. 2.6 - Формы сечения стержней силовых трансформаторов: 1 — пакеты листов; 2 — продольные каналы; 3 — поперечный канал

При большом сечении стержней их собирают из отдельных стальных пакетов, между которыми располагают продольные каналы шириной 5 — 6 мм, а в некоторых конструкциях и поперечный канал (рис. 2.6, г) для циркуляции

охлаждающей жидкости.

Стяжку листов стержней (опрессовку стержней) в силовых трансформаторах сравнительно небольшой мощности осуществляют с помощью деревянных или пластмассовых планок и стержней, устанавливаемых между стальным стержнем и жестким изоляционным цилиндром, на котором намотана обмотка НН (рис. 2.7, *а*).

В более мощных трансформаторах с магнитопроводами из холоднокатаной анизотропной стали стержни стягивают бандажами из стеклоленты или стальной ленты (рис. 2.7, *б*). Чтобы стальные бандажи не образовали короткозамкнутых витков, их разрезают и стягивают с помощью изоляционных пряжек. Для получения равномерного сжатия стальных листов перед наложением бандажей стержень опрессовывают на сборочном стенде. Опрессовка стержней обеспечивает необходимую жесткость конструкции магнитопровода и предотвращает повышенную вибрацию его листов, сопровождающуюся шумом.

В магнитопроводах из горячекатаной стали стержни стягивают стальными шпильками, изолированными относительно стержней трубками из изоляционного материала (рис. 2.7, *в*). Такой способ опрессовки при холоднокатаной стали недопустим, так как магнитные силовые линии огибают отверстия, пробитые в стальных листах для шпилек, и, следовательно, отклоняются от направления проката стали.

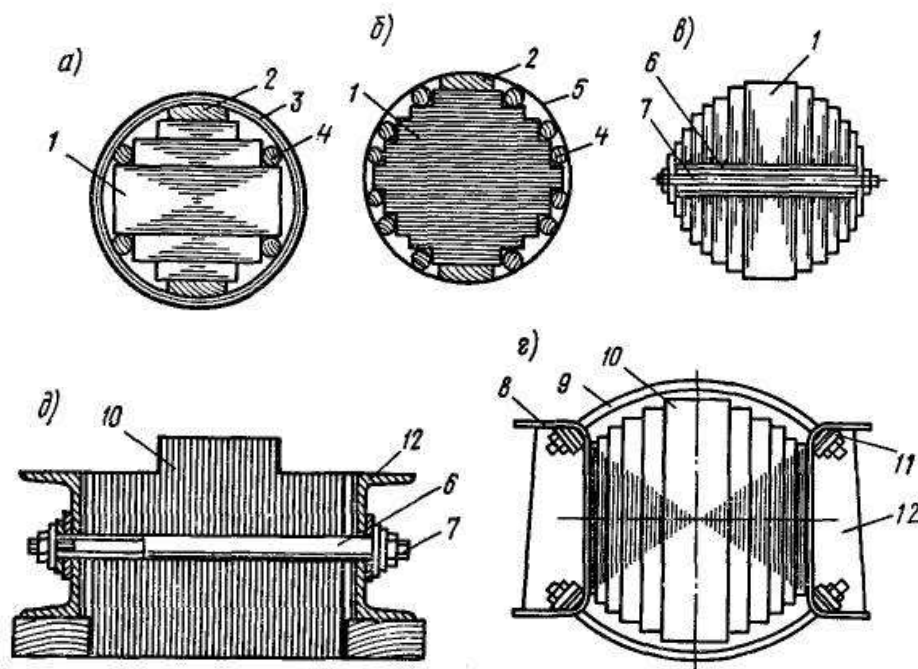


Рис. 2.7 - Способы прессовки стержней и ярм:

1 - шихтованный стержень; 2 - деревянная планка; 3 - изоляционный цилиндр катушки; 4 — деревянный стержень; 5 — бандаж из стеклоленты; б — изоляционная трубка; 7 — стальная шпилька; 8 — изоляционная пластина; 9 — полубандаж из стальной ленты; 10 — ярмо; 11 — изоляционная прокладка; 12 — ярмовая балка

Ярма, соединяющие стержни, выполняют обычно прямоугольного, Т-образного или ступенчатого сечения на 2 — 5 % больше сечения стержней. Это уменьшает индукцию в стали ярма и потери мощности в ней. Ярма стягивают с помощью деревянных или стальных опорных балок, бандажей из стеклоленты или стальной ленты (рис. 2.7, в) или посредством шпилек (рис. 2.7, д).

Магнитопровод вместе с опорными балками и другими прессующими деталями образует остов трансформатора. При работе силовых трансформаторов магнитопровод и другие стальные части находятся в сильном электрическом поле, вследствие чего они могут приобрести электрический заряд. Чтобы избежать этого, остов заземляют с помощью медных лент.

Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления. Применяют также и маломощные трансформаторы

маторы стержневого типа с одной или двумя катушками. Преимущество тороидальных трансформаторов — отсутствие в магнитной системе воздушных зазоров, что значительно уменьшает магнитное сопротивление магнитопровода.

В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штампованных пластин П-, Ш- и О-образной формы (рис. 2.8, а, б, в). При использовании листов Ш- и П-образной формы магнитопровод может быть собран “впереплет” или “встык”. Сборку пластин “встык” применяют при необходимости введения в магнитопровод воздушного зазора; в этом случае в месте стыка устанавливают изоляционные прокладки.

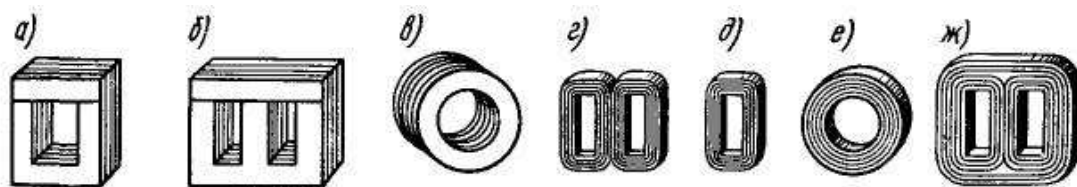


Рис. 2.8 - Магнитопроводы трансформаторов малой мощности: а, д — броневого, б, г — стержневого, в, е — тороидальный, ж — трехфазный

Большое значение получили также магнитопроводы, навитые из узкой ленты электротехнической стали (обычно из анизотропной холоднокатаной стали) или из специальных железоникелевых сплавов типа пермаллой. Их можно использовать для стержневых, броневого, тороидальных и трехфазных трансформаторов. Основными преимуществами их перед шихтованными являются лучшее использование ферромагнитного материала благодаря ориентации магнитного потока в направлении прокатки стали или пермаллоя и более высокое сопротивление вихревым токам, что обуславливает уменьшение потерь мощности в магнитопроводе, особенно при повышенных частотах. Ленточные магнитопроводы (рис. 2.8, г, д, е, ж) бывают неразъемными и разъемными. Разъемные ленточные магнитопроводы выполняют из двух половин. Чтобы уменьшить магнитное сопротивление магнитопровода в местах стыка, торцевые поверхности обеих половин шлифуют, затем вкладывают в катушку и склеивают по шлифованным поверхностям специальным клеем, изготовленным на основе эпоксидной смолы с ферромагнитным наполнителем. Моно-

литность конструкции ленточного магнитопровода обеспечивается путем применения клеящих лаков и эмалей.

Для трансформаторов, работающих при частоте 400 и 500 Гц, магнитопроводы выполняют из специальных сортов электротехнической стали с малыми удельными потерями при повышенной частоте, а также из железоникелевых сплавов типа пермаллой, которые имеют большую начальную и максимальную магнитные проницаемости и позволяют получить магнитные поля с большой индукцией при сравнительно слабой напряженности. Толщина листов составляет 0,2; 0,15; 0,1 и 0,08 мм. При частотах более 10—20 кГц магнитопроводы прессуют из порошковых материалов (магнитодиэлектриков и ферритов).

Обмотки. В современных трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо концентрически — одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня. В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором — *чередующимися*. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку НН, требующую меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи — обмотку ВН (рис. 2.9, а).

В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток применяют двойные концентрические (расщепленные) обмотки (рис. 2.9, б), в которых обмотку НН делят на две части с одинаковым числом витков. Аналогично можно выполнить и обмотку ВН. При чередующихся обмотках (рис. 2.9, в) всю обмотку подразделяют на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух или нескольких катушек НН. Чередующиеся обмотки применяют редко и в основном для специальных трансформаторов.

Обмотки трансформаторов изготавливают из медных или алюминиевых проводов. При использовании алюминия поперечное сечение провода берется

примерно на 70% больше, чем при использовании меди из-за большего удельного электрического сопротивления алюминия. В связи с этим габариты и масса трансформаторов с алюминиевыми обмотками больше, чем у трансформаторов с медными обмотками. При сравнительно небольших мощностях и токах обмотки выполняют из изолированного провода круглого сечения, при больших мощностях и токах применяют провода прямоугольного сечения. В ряде случаев обмотки наматывают из нескольких параллельных проводов.

По конструкции концентрические обмотки подразделяют на цилиндрические, непрерывные и винтовые.

Цилиндрические обмотки (рис. 2.10, а), выполненные из прямоугольного провода, обычно применяют в качестве обмоток низшего напряжения при мощностях до 250 кВ·А на один стержень (до 630 кВ·А для трехфазного трансформатора) и напряжении до 6 кВ. При мощности 10—16 кВ·А обмотку наматывают в один-два слоя, а при больших мощностях — в два слоя, соединенных последовательно (рис. 2.10, б).

В зависимости от силы тока каждый слой может состоять из одного или нескольких параллельных проводов (суммарный ток стержня обычно не превышает 800 А). Провод наматывают по винтовой линии на бумажно-бакелитовые цилиндры и одновременно изолируют его от стержня магнитопровода и от соседних катушек. Если обмотка имеет несколько слоев, то между ними прокладывают изоляционные планки, образующие каналы для прохода масла.

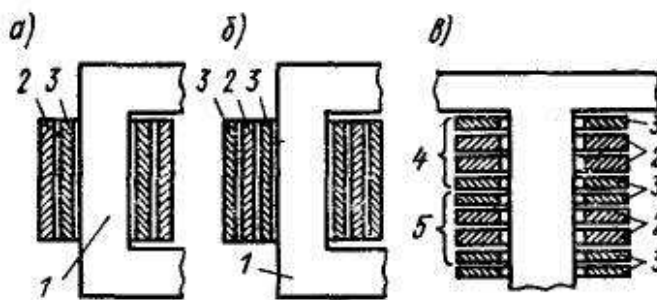


Рис. 2.9 - Расположение обмоток на стержнях в трансформаторах:
1 — стержень; 2 — обмотка ВН; 3 - обмотка НН; 4, 5 - группы катушек

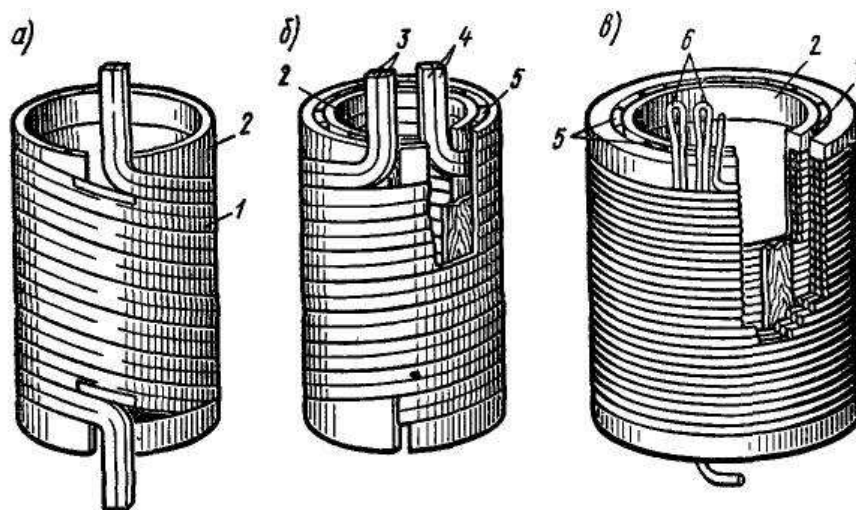


Рис. 2.10 - Цилиндрические обмотки:

1 - витки из прямоугольного провода; 2 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 3, 4 — выводные концы; 5 — вертикальные рейки; 6 — внутренние ответвления обмотки; 7 — аксиальный охлаждающий канал

Обмотки высшего напряжения трансформаторов мощностью до 250 кВ·А на один стержень и напряжением до 35 кВ, а также обмотки низшего напряжения при 3 — 10 кВ выполняют цилиндрическими многослойными (рис. 2.10, в). Для обмоток используют провод круглого или прямоугольного сечения, который наматывают на жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры; каждый слой образуется из одного или нескольких параллельных проводов (суммарный ток стержня обычно не превышает 135 А). Витки всех слоев соединяют последовательно; изоляцией между слоями служит кабельная бумага. При большом количестве слоев для улучшения охлаждения обмотку разделяют на две концентрические катушки. Между этими катушками оставляют канал для прохода масла. Иногда в качестве обмоток высшего напряжения при мощностях до 335 кВ·А на стержень и напряжении до 35 кВ применяют многослойные цилиндрические катушечные обмотки (рис. 2.11, а). Такая обмотка состоит из ряда многослойных дисковых катушек, расположенных вдоль стержня и выполненных из провода небольшого сечения (ток до 45 А). Между катушками оставляют каналы для охлаждения.

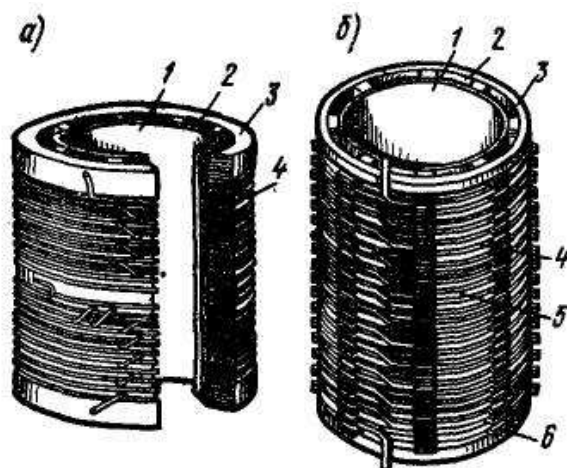


Рис. 2.11 - Цилиндрическая катушечная (а) и непрерывная (б) обмотки: 1 - бумажно - бакелитовый цилиндр; 2 - аксиальный охлаждающий канал; 3 — опорное изолирующее кольцо; 4 — дисковые катушки; 5 -радиальные охлаждающие каналы; 6 - изоляционная рейка с планками

В трансформаторах мощностью от 160 до 63000 кВ·А на стержень и выше при напряжениях от 3 до 220 кВ в качестве обмоток высшего напряжения часто применяют непрерывные спиральные катушечные обмотки. Обмотку называют *непрерывной* потому, что ее наматывают без разрывов, т. е. переход из одной катушки в другую производится непрерывно, без паяк. В непрерывной обмотке может быть до шести параллельных проводов. Такая обмотка (рис. 2.11, б) состоит из ряда последовательно соединенных между собой плоских дисковых катушек (секций), выполненных из провода прямоугольного сечения. Катушки имеют одинаковые размеры и расположены одна над другой. Для охлаждения между катушками создают радиальные каналы, образованные прокладками из электрокартона. Непрерывные спиральные катушечные обмотки можно применять и в качестве обмоток низшего напряжения при токах 20 — 400 А (при медных проводах) и 10—200 А (при алюминиевых проводах).

Винтовые одно- и многоходовые обмотки (рис. 2.12, а) используют обычно в качестве обмоток низшего напряжения в трансформаторах мощностью свыше 250 кВ·А на стержень при напряжениях до 15 кВ и токах свыше 300 А для медных проводов и 150 — 200 А для алюминиевых. Винтовую обмотку наматывают по винтовой линии из нескольких параллельных проводов

прямоугольного сечения, прилегающих друг к другу в радиальном направлении. Подобно резьбе винта она может быть одно-, двух- и иногда многоходовой. Между отдельными витками и параллельными ходами располагают охлаждающие каналы.

При использовании винтовых и непрерывных катушечных обмоток, выполненных из нескольких параллельных проводников, необходимо принимать меры для равномерного распределения между ними тока, так как более удаленные от оси катушки провода имеют несколько большую длину, а следовательно, и активное сопротивление (чем расположенные ближе к оси).

Кроме того, витки, образуемые этими проводами, сцеплены с различными по величине магнитными потоками и в них индуцируются разные ЭДС. Чтобы уравнивать длины параллельных проводов и создать одинаковые условия для индуцирования в них ЭДС, осуществляют транспозицию проводов, т. е. провода периодически по длине обмотки меняют местами (рис. 2.12, б) так, чтобы каждый провод занимал все возможные положения относительно оси катушки. Транспозиция может быть общей (изменяют на обратное расположение всех параллельных проводов) — рис. 2.12, в и групповой (изменяют местами две подгруппы проводов) — рис. 2.12, г.

В настоящее время широкое применение получают винтовые обмотки из транспонированного провода, в котором отдельные проводники (жилы) с лаковой изоляцией меняются местами в процессе изготовления провода (рис. 2.13, а, в). Поверх него накладывают общую изоляцию из кабельной бумаги. Применяют также подразделенные провода (рис. 2.13, б), состоящие из двух-трех изолированных проводников, охватываемых общей изоляцией.

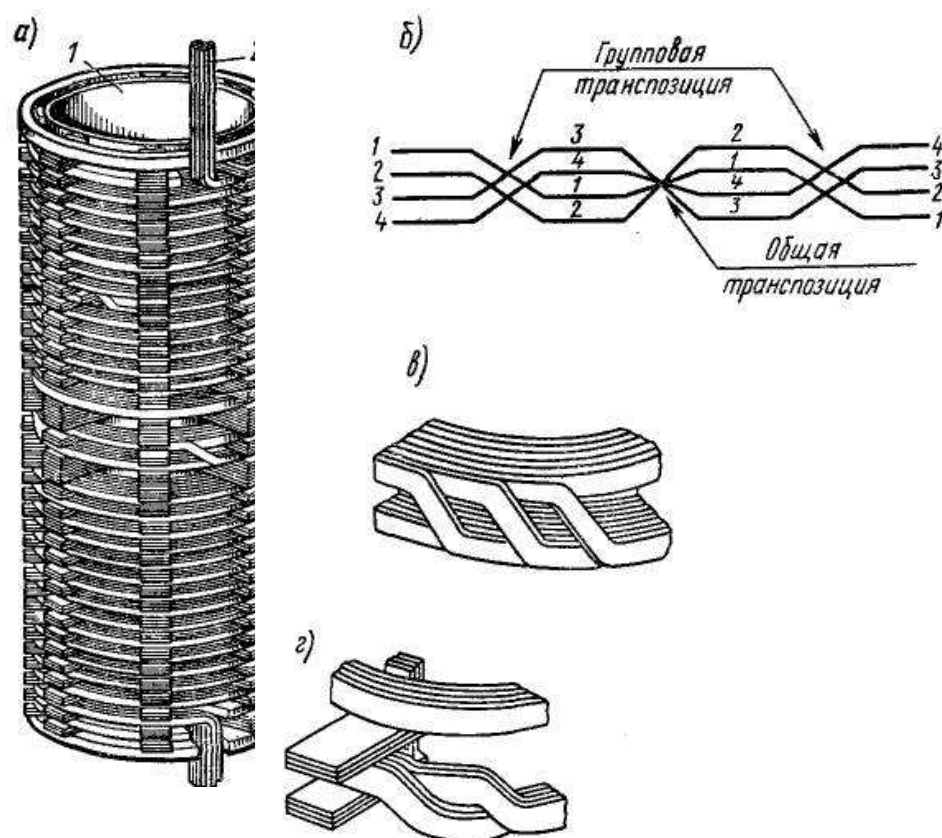


Рис. 2.12 - Одноходовая винтовая обмотка (а) и схемы транспозиции ее параллельных проводов (б); (в) и (з):

1 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 2 — провода; 3 — аксиальный охлаждающий канал; 4 — опорное изолирующее кольцо; 5 — витки из параллельных проводов; 6 — изоляционная рейка с планками; 7 — радиальные охлаждающие каналы

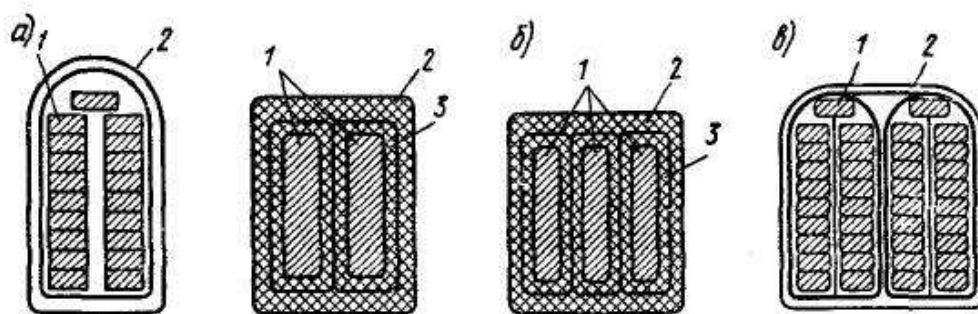


Рис 2.13 - Специальные провода:

а - транспонированный марки ПТБ; б - подразделенный марки ПБП (двух- и трехжильный); в - подразделенный транспонированный марки ППТБ; 1 — проводники; 2 — изоляция провода; 3 — изоляция проводников

Такое разделение проводника приводит к значительному (на 20—30%) снижению добавочных потерь от индуцируемых в проводниках вихревых токов.

В трансформаторах малой мощности и микротрансформаторах исполь-

зуют *однослойные и многослойные обмотки* из круглого провода с эмалевой или хлопчатобумажной изоляцией, которые наматывают на гильзу или на каркас из электрокартона (рис. 2.14, *а*); между слоями проводов прокладывают изоляцию из кабельной бумаги или ткани. В микротрансформаторах часто обмотки выполняют из алюминиевой фольги толщиной 30—20 мкм. Изоляцией здесь служит окисная пленка фольги, которая обладает достаточной теплоемкостью, теплопроводностью и может выдерживать рабочее напряжение до 100 В. В высокочастотных трансформаторах применяют расщепленные многожильные провода типа литцендрат (ЛЕШО, ЛЭЛО и др.). Для трансформаторов, работающих в условиях высокой температуры и радиоактивного облучения, используют провода из анодированного алюминия и с изоляцией из кварцевых нитей.

В последнее время широко применяются *галетные обмотки*. Такая обмотка состоит из отдельных унифицированных элементов — галет, каждая из которых представляет собой законченный конструктивный элемент (рис. 2.14, *б*). Галеты собирают на стержне магнитопровода и соединяют между собой в соответствии с электрической схемой трансформатора.

Путем последовательного и параллельного соединения унифицированных галет можно получать различные значения токов и напряжений трансформатора. Галеты могут быть выполнены как из обмоточного провода, так и из алюминиевой фольги. В тороидальных трансформаторах обмотки располагают по всей окружности магнитопровода, причем на внутренней поверхности укладывают большее число слоев, чем на внешней. Изоляцию обмоток от магнитопровода осуществляют путем обматывания последнего лентой из изоляционного материала.

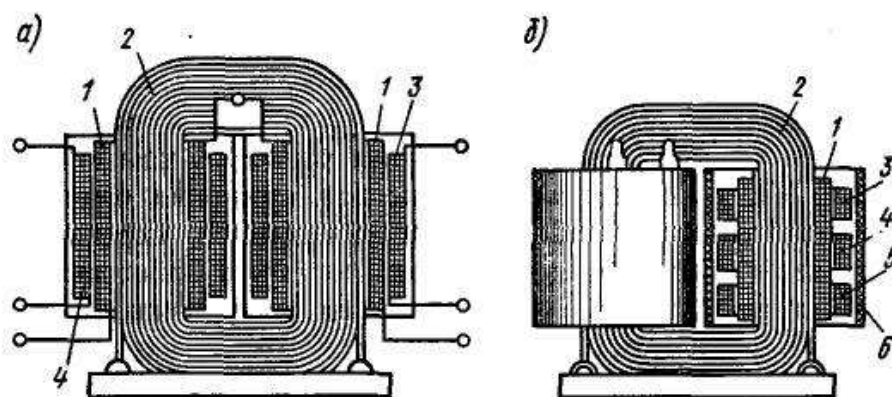


Рис. 2.14 - Устройство трансформаторов малой мощности:

1 — первичная обмотка; 2 — магнитопровод; 3, 4, 5 — вторичные обмотки; 6 - изоляционная гильза

Изоляция силовых трансформаторов. В трансформаторах изоляцию обмоток подразделяют на главную — изоляцию их от магнитопровода и между собой (обмоток НН от ВН) и продольную — изоляцию между витками, слоями и катушками каждой обмотки. Имеется также изоляция отводов от обмоток, переключателей и выводов. Изоляция обмоток трансформатора от заземленных частей и друг от друга определяется в основном электрической прочностью при частоте 50 Гц. Она обеспечивается соответствующим выбором величины изоляционных промежутков, которые в масляных трансформаторах одновременно выполняют роль охлаждающих каналов.

Чтобы предотвратить пробой изоляции при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений в высоковольтных трансформаторах, между обмотками дополнительно ставят жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры или мягкие цилиндры из электроизоляционного картона. При этом (во избежание электрического разряда по поверхности изоляционных цилиндров) они должны иметь по высоте большие размеры, чем обмотки (рис. 2.15). Между обмотками высшего напряжения различных фаз устанавливают межфазную изоляционную перегородку. Изоляционное расстояние обмоток от ярма обеспечивают шайбами и прокладками из электроизоляционного картона. Между концевой изоляцией обмотки и ярмовыми балками магнитопровода в некоторых трансформаторах устанавливают металлические разрезные или неметалличе-

ские прессующие кольца.

В трансформаторах напряжением 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений две начальные и две конечные катушки обмотки высшего напряжения выполняют с усиленной изоляцией.

Такая изоляция ухудшает условия охлаждения начальных и конечных катушек, поэтому их выполняют из провода большего поперечного сечения.

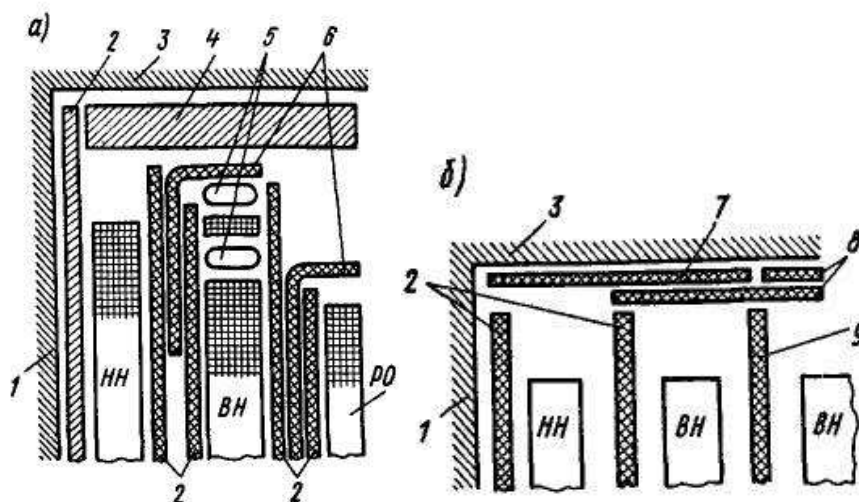


Рис. 2.15 - Конструкция главной изоляции трансформаторов класса напряжения 110 кВ (а) и 35 кВ (б):

1 - стержень магнитопровода; 2 — изоляционные цилиндры; 3 — ярмо; 4 — прессующее кольцо; 5 — емкостные кольца, 6 — изоляционные угловые шайбы; 7 - изоляционная шайба; 8 - изоляционные прокладки; 9 - междуфазная перегородка; ВН и НН - обмотки высшего и низшего напряжений; РО - регулировочная обмотка

В трансформаторах напряжением 110 кВ и выше для уменьшения напряжения на концевых катушках обмотки высшего напряжения и выравнивания электрического поля у концов обмотки применяют емкостную компенсацию в виде емкостных витков и емкостных колец (рис. 2.16), которые служат электрическими экранами (рис. 2.19).

Изоляция между катушками, слоями и витками (продольная изоляция) обеспечивает как электрическую прочность обмотки при частоте 50 Гц, так и прочность при воздействии импульсных перенапряжений. Обычно межкатушечную изоляцию осуществляют радиальными масляными каналами, простыми и угловыми шайбами из электроизоляционного картона. В качестве межслойной изоляции обычно применяют несколько слоев кабельной бумаги,

электроизоляционный картон или лакоткань. Изоляцию между витками обеспечивают в основном собственной изоляцией обмоточного провода.

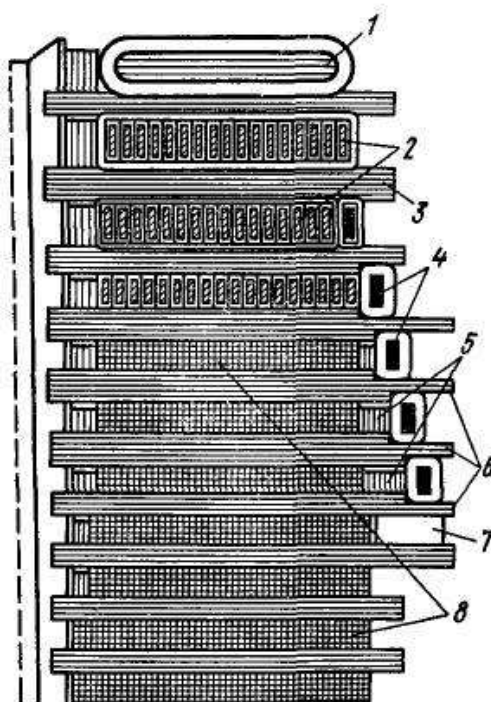


Рис. 2.16 - Установка емкостного кольца и экранирующих витков на обмотке:

1 — емкостное кольцо; 2 — дисковые входные катушки с дополнительной изоляцией; 3 — изоляционные прокладки; 4 — экранирующие витки; 5 — изоляционные полосы; 6 — выступы удлиненных прокладок; 7 — опорный изоляционный сегмент; 8 — непрерывная обмотка

Вводы трансформатора. Для вывода наружу концов от обмоток в трансформаторах, охлаждаемых маслом или негорючим жидким диэлектриком, используют проходные фарфоровые изоляторы, размещаемые на крышке или на стенке бака. Проходной изолятор вместе с токоведущим стержнем и крепежными деталями называют *вводом*.

Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность (рис. 2.17, а), а вводы трансформаторов, предназначенных для наружной установки, снабжают ребрами (рис. 2.17, б), число которых зависит от напряжения соответствующей обмотки трансформатора. При наличии ребер увеличивается расстояние между токоведущим стержнем и корпусом по поверхности изолятора и уменьшается вероятность

поверхностного разряда во время дождя, при попадании на изолятор листьев и т. п. Крепление ввода к крышке бака и токоведущего стержня в изоляторе должно быть прочным, а применяемые уплотнения — масло-стойкими.

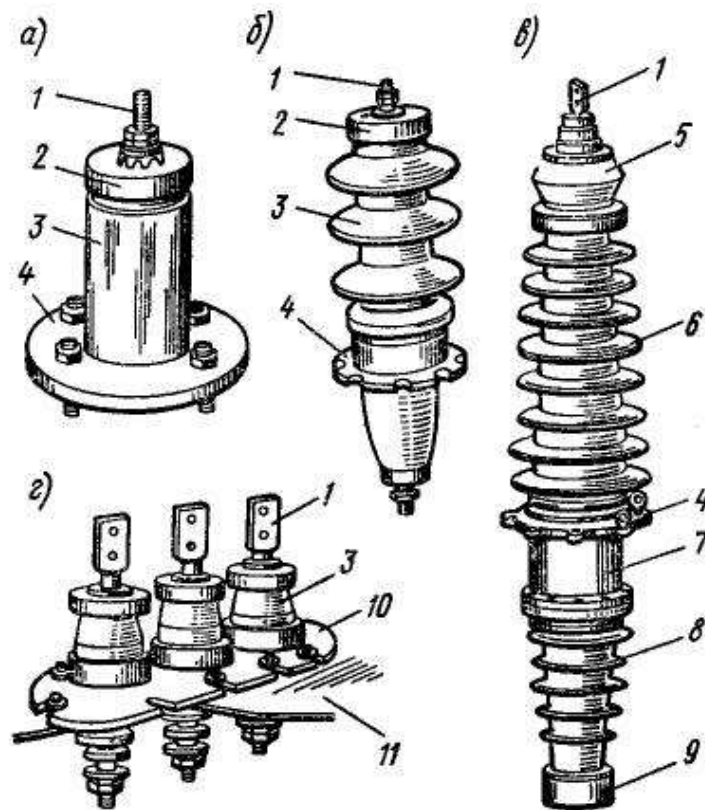


Рис. 2.17 - Вводы трансформаторов :

а — для внутренней установки ; б — для наружной установки; в — маслонаполненные для напряжения 110 кВ, г — при больших токах; / -токоведущий стержень; 2 — колпак; 3 — фарфоровый изолятор; 4 - металлический фланец; 5 --маслорасширитель с масляным затвором; 6 — верхняя фарфоровая покрывка; 7 — соединительная чугунная втулка; 8 — нижняя фарфоровая покрывка; 9 — алюминиевый экран; 10 — латунный фланец; 11 -крышка бака

При напряжениях свыше 110 кВ вводы часто выполняют составными — из двух фарфоровых изоляторов (рис. 2.17, в). Внутри такой ввод заполняют маслом, которое не сообщается с маслом, находящимся в баке трансформатора. Токоведущий кабель проходит внутри металлической трубы, которую изолируют кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми цилиндрами с установленными в них металлическими обкладками из фольги (для выравнивания электрического поля).

В трансформаторах, рассчитанных на большие токи, вокруг ввода создается большой магнитный поток, вследствие чего в крышке бака и крепежном

фланце возникают значительные вихревые токи, нагревающие эти детали до высокой температуры. Во избежание этого при больших токах вместо стального или чугунного фланцев применяют латунные и в крышке вырезают для них общее отверстие (рис. 2.17, з). При этом магнитные потоки всех вводов замыкаются вокруг отверстия и при одно- и трехфазном токах сильно уменьшаются из-за взаимной компенсации магнитодвижущих сил. В трансформаторах, охлаждаемых воздухом, концы от обмоток присоединяют к контактными зажимам, которые укрепляют к остову трансформатора.

2.4 Охлаждение трансформаторов

Способы охлаждения. Конструктивное выполнение трансформатора определяется в значительной мере способом его охлаждения, который зависит от номинальной мощности. При увеличении мощности трансформатора необходимо увеличивать и интенсивность его охлаждения. В силовых трансформаторах для отвода теплоты от обмоток и магнитопровода применяют следующие способы охлаждения: воздушное, масляное и посредством негорючего жидкого диэлектрика. Каждый вид охлаждения имеет соответствующее условное обозначение.

Трансформаторы с воздушным охлаждением (сухие трансформаторы). При естественном воздушном охлаждении магнитопровод, обмотки и другие части трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому охлаждение их происходит путем конвекции воздуха и излучения. Сухие трансформаторы (рис. 2.18) устанавливают внутри помещений (в зданиях, производственных цехах и пр.), при этом главным требованием является обеспечение пожарной безопасности.

В эксплуатации они удобнее масляных, так как исключают необходимость периодической очистки и смены масла. Следует, однако, отметить, что воздух обладает меньшей электрической прочностью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных. Из-за меньшей

теплопроводности воздуха по сравнению с маслом электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах меньше, чем в масляных, что приводит к увеличению сечения проводов обмотки и магнитопровода. Как следствие этого, масса активных частей (обмоток и магнитопровода) сухих трансформаторов больше, чем масляных.

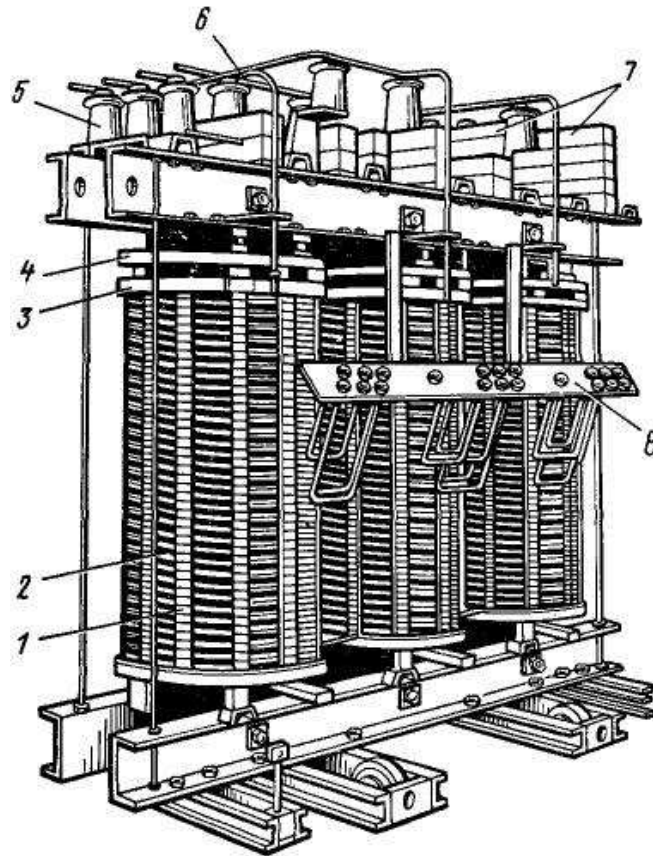


Рис. 2.18 - Сухой трансформатор мощностью 320 кВ·А без кожуха: 1 - вертикальные стяжные шпильки; 2 — обмотки ВН; 3 - фарфоровые подкладки для прессовки обмоток; 4 — стальное прессующее кольцо; 5 — опорные изоляторы отводов ВН; 6 — отводы ВН; 7 — фарфоровые подкладки для крепления отводов НН; 8 — доска зажимов ВН

В настоящее время сухие трансформаторы имеют мощности до 10 МВ·А и напряжения обмотки ВН до 35 кВ. Их устанавливают только в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха до 80% во избежание чрезмерного увлажнения обмоток.

Сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением могут иметь открытое (С), защищенное (СЗ) или герметизированное (СГ) исполнение. Трансформаторы типа СЗ закрывают защитным кожухом с отверстиями, а типа СГ — герметическим кожухом. Для повышения интенсивности охлажде-

ния применяют обдув обмоток и магнитопровода потоком воздуха от вентилятора. Сухие трансформаторы с воздушным дутьем имеют условное обозначение СД.

Трансформаторы малой мощности выполняют, как правило, с охлаждением типа С. В некоторых случаях их помещают в корпус, залитый терморезистивными компаундами на основе эпоксидных смол или других подобных материалов. Такие компаунды обладают высокими электроизоляционными и влагозащитными свойствами. После затвердевания они не расплавляются при повышенных температурах и обеспечивают надежную защиту трансформатора от механических и атмосферных воздействий.

Трансформаторы с масляным охлаждением. В трансформаторах с естественным масляным охлаждением (М) магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным (трансформаторным) маслом (рис. 2.19)

Трансформаторное масло обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит теплоту от обмоток и магнитопровода трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем трансформатор. Погружение трансформатора в бак со специальным маслом обеспечивает также повышение электрической прочности изоляции его обмоток и предотвращает ее увлажнение и потерю изоляционных свойств под влиянием атмосферных воздействий. При правильной эксплуатации масляных трансформаторов, когда температура изоляции в наиболее нагретом месте не превышает 105 °С, трансформатор может служить 20 — 25 лет. Повышение температуры на 8 °С приводит к сокращению срока службы трансформатора примерно в два раза. В трансформаторах мощностью 20 — 30 кВ·А выделяется сравнительно небольшое количество теплоты, поэтому их баки имеют гладкие стенки; у более мощных трансформаторов (20—1800 кВ·А) поверхность охлаждения бака искусственно увеличивают, применяя ребристые или волнистые стенки либо окружая бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет конвекции.

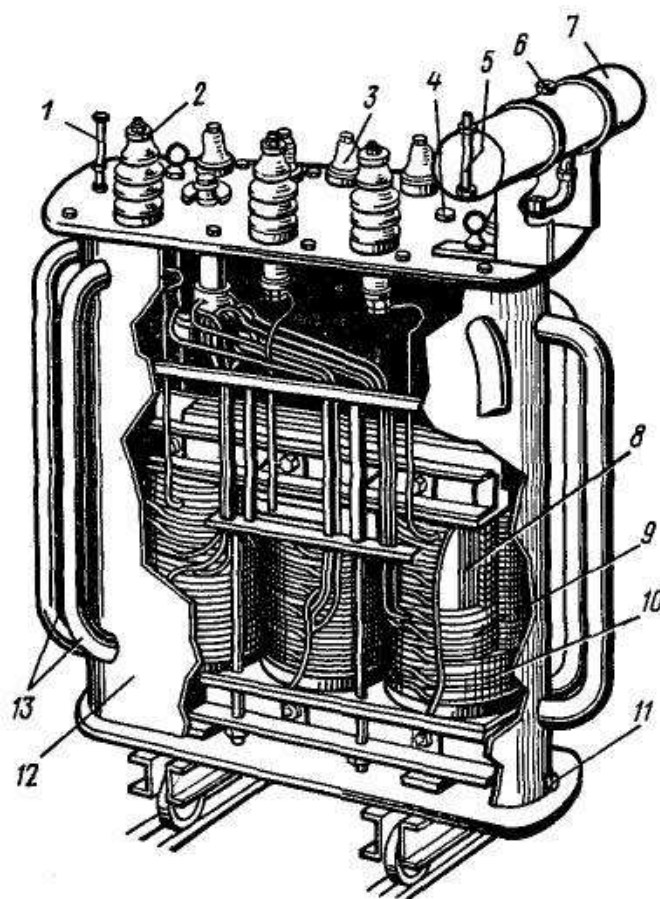


Рис. 2.19 - Устройство трехфазного масляного трансформатора средней мощности:

1 — термометр; 2 — выводы обмотки ВН; 3 — выводы обмотки НН; 4, 6 — пробки для заливки масла; 5 - указатель уровня масла; 7 — расширитель; 8 — магнитопровод; 9 — обмотка НН; 10 - обмотка ВН; 11 - пробка для спуска масла; 12 — бак для масла; 13 — трубы для охлаждения масла

Для повышения интенсивности охлаждения в трансформаторах мощностью более 1800 кВ·А к баку пристраивают навесные или отдельно установленные трубчатые теплообменники (радиаторы), которые с помощью патрубков с фланцами сообщаются с внутренней полостью бака (рис. 2.20, а). В радиаторе происходит усиленная циркуляция масла и интенсивное охлаждение. Масляные трансформаторы типа М применяют для мощностей 10—10000 кВ·А.

Трансформаторы мощностью 10000—63000 кВ·А выполняют обычно с дутьем (тип Д). В этом случае теплоотдача с поверхности радиаторов форсируется путем обдува их вентиляторами. Каждый радиатор обдувается двумя вентиляторами (рис. 2.20, б), при этом теплоотдача увеличивается в 1,5 — 1,6

раза. В трансформаторах с охлаждением типа ДЦ масло насосом откачивается из бака и прогоняется через навесные или отдельно установленные теплообменники (охладители), обдуваемые воздухом. Охлаждение с принудительной циркуляцией масла применяют при мощностях 16000—250000 кВ·А и выше. При использовании масляно-водяного охлаждения нагретое масло проходит через теплообменники, охлаждаемые водой. Циркуляция масла осуществляется за счет естественной конвекции (при охлаждении типа МВ) или же с помощью насоса (при охлаждении типа Ц).

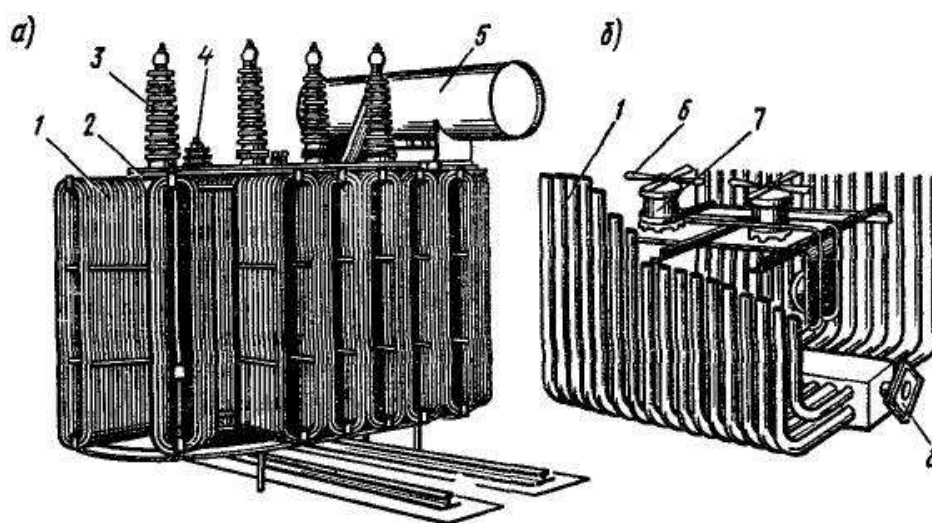


Рис. 2.20 - Трансформатор большой мощности с навесными радиаторами (а) и установка вентиляторов для обдува радиаторов (б): 1 - навесной радиатор; 2 - бак трансформатора; 3 — вывод обмотки ВН; 4 — вывод обмотки НН; 5 — расширитель; 6 — вентилятор; 7 — электродвигатель вентилятора; 8 - фланец для присоединения радиатора к баку

Трансформаторы, охлаждаемые негорючим жидким диэлектриком.

Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД выполняют с герметизированным баком, который заполняют негорючим жидким диэлектриком. Обычно применяют синтетические изоляционные материалы — совтол и др., которые имеют примерно такие же электроизоляционные свойства и теплопроводность, как и трансформаторное масло. Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД пожаробезопасны и могут устанавливаться в закрытых помещениях. Их выпускают мощностью 160 — 2500 кВ·А при напряжении 6 и 10 кВ.

Совтол представляет собой смесь полихлордифенила (совола) с три-

хлорбензолом, который добавляется для уменьшения вязкости и температуры застывания смеси. При использовании совтола в умеренном климате он содержит 65 % полихлордифенила и 35 % трихлорбензола; для тропических условий соответственно 90 и 10%. Он дороже трансформаторного масла, токсичен, что требует тщательной герметизации системы охлаждения.

Защита масла от соприкосновения с атмосферным воздухом. Во время работы масло в трансформаторе нагревается и расширяется. При уменьшении нагрузки оно, охлаждаясь, возвращается к первоначальному объему. Поэтому масляные трансформаторы мощностью 25 кВ·А и выше имеют небольшой дополнительный *бак-расширитель* (рис. 2.21), соединенный с внутренней полостью основного бака. При нагревании трансформатора изменяется объем масла, находящегося в расширителе. Объем его составляет около 10% от объема масла в баке. Применение расширителя позволяет значительно сократить поверхность соприкосновения масла с воздухом, что уменьшает его загрязнение и увлажнение. Расширители имеют воздухоосушитель, заполненный сорбентом — веществом, поглощающим влагу из воздуха, поступающего в расширитель. При мощности 160 кВ·А и выше на них устанавливают также *термосифонный фильтр* для непрерывного обезвоживания и очистки масла.

Для более надежного предохранения масла от окисления трансформаторы большой мощности выполняют герметизированными с полной изоляцией масла, находящегося в расширителе, от атмосферного воздуха. Это осуществляется с помощью подушки, образующейся из инертного газа (азота) и расположенной между поверхностью масла и гибкой растягивающейся мембраной — *азотная защита*. Трансформаторы с азотной защитой можно выполнять также и без расширителя.

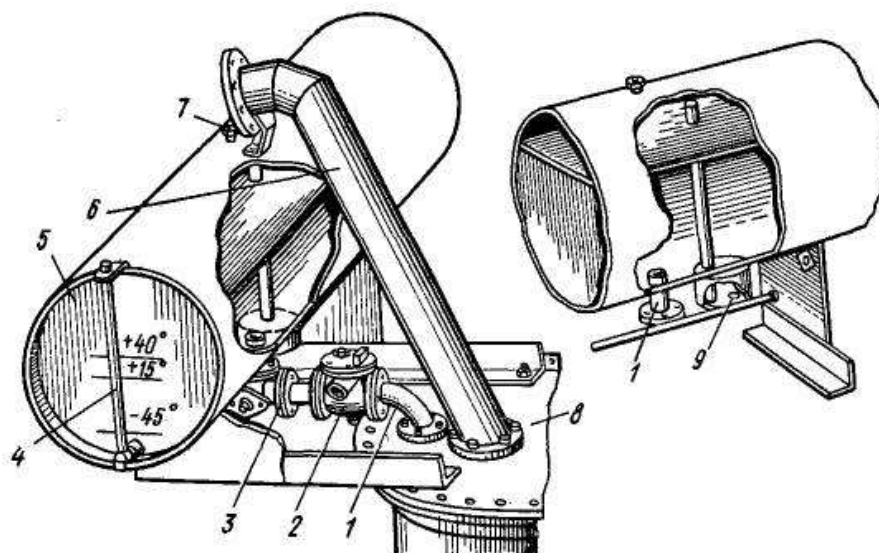


Рис. 2.21 - Установка расширителя и выхлопной трубы:

1 — маслопровод; 2 — газовое реле; 3 — кран для отсоединения расширителя ; 4 — указатель уровня масла; 5 — расширитель; 6 — выхлопная труба; 7 — пробка для заливки масла; 8 — бак трансформатора; 9 — отстойник

Арматура и подъемные устройства. При работе трансформатора масло нагревается, разлагается и загрязняется продуктами окисления (стареет), поэтому его периодически очищают или заменяют. Масляные трансформаторы во избежание опасности пожара и взрыва устанавливают на открытых ограждаемых площадках или в специально сооруженных помещениях с огнестойкими стенами, опорами и перекрытиями. Для заливки, отбора пробы, спуска и фильтрации масла масляные трансформаторы снабжают соответствующей арматурой (кранами, вентилями, пробками).

Все трансформаторы имеют различные устройства для их подъема и перемещения: рым-болты, крюки, переставные катки и поворотные тележки.

Устройства для контроля за состоянием масла и системы охлаждения. Чтобы осуществлять контроль за уровнем и температурой масла, масляные трансформаторы имеют указатели уровня и температуры. Указатель уровня обычно устанавливают на расширителе, а указатель температуры — на крышке основного бака. В трансформаторах мощностью до 1000 кВ·А для этой цели используют ртутный термометр, а в трансформаторах большей мощности и в герметизированных трансформаторах — специальный электри-

ческий термосигнализатор. Трансформаторы с охлаждением типов Д, ДЦ и НД имеют два термосигнализатора, один из которых служит для измерения температуры верхних слоев масла, а другой — для автоматического управления процессом дутья.

Система автоматики должна обеспечивать: автоматическое включение и отключение системы охлаждения одновременно с включением в сеть и отключением трансформатора, регулирование интенсивности охлаждения в зависимости от нагрузки, включение резервного охладителя взамен вышедшего из строя, ввод резервного источника питания при снижении или исчезновении питания электродвигателей вентиляторов и насосов системы охлаждения и соответствующую сигнализацию о прекращении работы системы охлаждения. Трансформаторы мощностью 10000 кВ·А и выше оборудуют также реле низкого уровня масла, находящегося в расширителе, которое сигнализирует о снижении уровня масла и автоматически отключает трансформатор при недопустимом его уменьшении.

Защита трансформатора от аварий. Для защиты от возможных аварий трансформаторы мощностью более 1000 кВ·А имеют специальные газовые реле, которые устанавливают в трубопроводе между основным баком и расширителем. При значительном выделении взрывоопасных газов, возникающих в результате разложения масла, реле автоматически выключает трансформатор, предупреждая развитие аварии. В этих трансформаторах устанавливают также *выхлопную трубу* (см. рис. 2.21), закрытую стеклянной мембраной. При внезапном повышении внутреннего давления образовавшиеся газы выдавливают мембрану и выходят в атмосферу, предотвращая деформацию бака.

Чтобы предотвратить появление высокого потенциала на обмотке НН при повреждении изоляции обмотки ВН, в трансформаторах, у которых обмотка НН имеет напряжение до 0,69 кВ, между этой обмоткой и заземленным баком включают пробивной предохранитель, который пробивается при напряжении 1000 В.

2.5 Идеализированный трансформатор

Для выяснения сущности физических процессов, происходящих в трансформаторе, рассмотрим идеализированный трансформатор, у которого магнитный поток Φ полностью замыкается по стальному магнитопроводу и сцеплен с обеими обмотками, а потери в стали отсутствуют. К первичной обмотке трансформатора (рис. 2.22, а) подводится синусоидальное напряжение $u_1 = U_m \sin \omega t$, благодаря чему по этой обмотке проходит переменный ток, создающий переменный магнитный поток. Переменный поток наводит в обмотках трансформатора ЭДС $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$; $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$.

В режиме холостого хода цепь вторичной обмотки разомкнута и ток $i_2 = 0$. При этом для контура первичной обмотки трансформатора

$$u_1 = i_1 r_1 + \varpi_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.6)$$

где u_1 — мгновенное значение приложенного к первичной обмотке напряжения.

Уравнение (2.6) справедливо, если принять, что не только $i_2 = 0$, но и отсутствуют потери в стали магнитопровода (от вихревых токов и гистерезиса); иначе эти потери должны были бы учитываться в виде потерь от тока, проходящего по замкнутой накоротко вторичной обмотке с большим активным сопротивлением. Вводя в формулу (2.6) значение ЭДС $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$, индуцируемой в первичной обмотке переменным магнитным потоком, и пренебрегая падением напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки $i_1 r_1$ из-за его малости, получаем

$$u_1 + e_1 = 0, \quad (2.7)$$

т. е. напряжение, приложенное к первичной обмотке, практически полностью уравновешивается индуцированной в этой обмотке ЭДС.

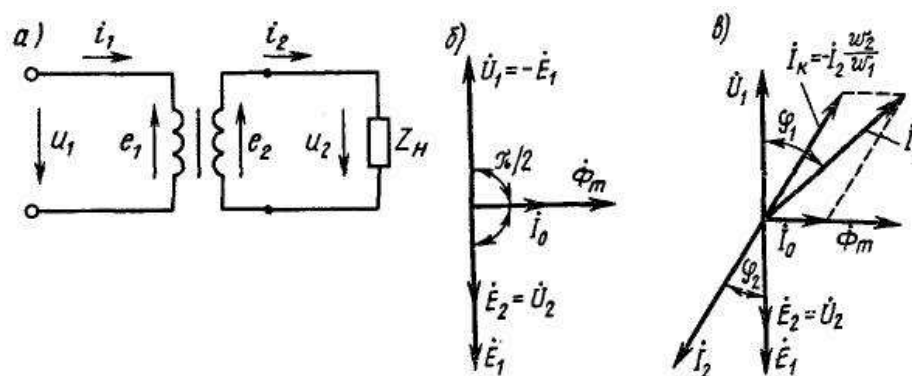


Рис. 2.22 - Схема включения (а) и векторные диаграммы (б, в) идеализированного трансформатора

Если питающее напряжение u_1 изменяется по синусоидальному закону $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, то магнитный поток также изменяется синусоидально, отставая по фазе от приложенного напряжения на угол 90° ,

$$\Phi = \int \frac{u_1}{w_1} dt = \frac{U_{1m}}{w_1} \int \sin \omega t dt = -\Phi_m \cos \omega t + C = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Можно показать, что постоянная интегрирования в установившемся режиме $C = 0$.

Связь между ЭДС и магнитным потоком определяется из уравнения

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d}{dt} \left[\Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] = -w_1 \omega \Phi_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= 2\pi f w_1 \Phi_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

и выражается для амплитудного значения ЭДС формулой $E_{1m} = 2\pi f w_1 \Phi_m$ или для действующего значения формулой

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (2.8)$$

Учитывая синусоидальный характер изменения напряжения u_1 и ЭДС e_1 , уравнение (2.7) можно представить в комплексной форме:

$$\dot{U} + \dot{E} = 0. \quad (2.9)$$

Уравнение (2.9) справедливо для идеализированного трансформатора, в котором пренебрежимо мало активное сопротивление обмоток и отсутствуют потери в стали магнитопровода. Однако, несмотря на принятые допущения, оно правильно определяет сущность качественных процессов, происходящих в

трансформаторе, и поэтому является одним из фундаментальных в теории электрических машин. Количественные ошибки, вызванные идеализацией трансформатора, можно всегда довольно легко подсчитать.

Предположив, что насыщение в стали трансформатора отсутствует и весь магнитный поток замыкается по стальному магнитопроводу, можно считать ток первичной обмотки идеализированного трансформатора прямо пропорциональным магнитному потоку. В связи с этим на векторной диаграмме идеализированного трансформатора в режиме холостого хода (рис. 2.22, б) ток холостого хода \dot{I}_0 изображен вектором, совпадающим по направлению с вектором магнитного потока $\dot{\Phi}_0$. На этой же диаграмме векторы ЭДС \dot{E}_1 и напряжения \dot{U}_1 показаны в противофазе в соответствии с уравнением (2.9), а вектор магнитного потока $\dot{\Phi}_m$ опережает вектор ЭДС на 90° . Поскольку магнитный поток не имеет действующего значения, на диаграмме показано его амплитудное значение. Там же показан вектор ЭДС \dot{E}_2 , совпадающий по фазе с вектором \dot{E}_1 так как ЭДС E_2 индуцируется тем же самым магнитным потоком, что и E_1 и может быть определена по формуле

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (2.10)$$

При работе под нагрузкой для первичной обмотки идеализированного трансформатора можно написать уравнение

$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2),$$

где Φ_1 и Φ_2 — потоки, создаваемые токами первичной и вторичной обмоток.

Обозначая, как и при холостом ходе $e_1 = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2)$,

получаем

$$u_1 + e_1 = 0,$$

т. е. такое же соотношение, что и при холостом ходе. Очевидно, если первичное напряжение при нагрузке идеализированного трансформатора остается неизменным, то величина ЭДС e_1 такая же, как и при холостом ходе. Сле-

довательно, результирующий поток при нагрузке равен потоку при холостом ходе:

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0.$$

или в комплексной форме

$$\dot{\Phi}_{m1} + \dot{\Phi}_{m2} = \dot{\Phi}_{m0} \quad (2.11)$$

Неизменность магнитного потока при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важнейшим свойством трансформатора. Из этого свойства следует закон равновесия магнитодвижущих сил (МДС) в трансформаторе:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0, \quad (2.12)$$

где F_1 и F_2 — МДС, создаваемые первичной и вторичной обмотками трансформатора при нагрузке; F_0 — МДС, создаваемая первичной обмоткой при холостом ходе.

При переменном токе оперируют с амплитудами МДС; при этом из (2.12) следует, что

$$\sqrt{2}I_1w_1 + \sqrt{2}I_2w_2 = \sqrt{2}I_0w_1$$

или

$$I_1 = I_0 + \left[-I_2 \left(\frac{w_2}{w_1} \right) \right]. \quad (2.13)$$

Для наглядности уравнение (2.13) можно представить иначе:

$$I_1 = I_0 + I_k, \quad (2.14)$$

где $I_k = -I_2 \left(\frac{w_2}{w_1} \right)$ — нагрузочная составляющая тока первичной обмотки

(компенсационный ток).

Таким образом, МДС, создаваемая током I_k , равна по величине и противоположна по фазе МДС вторичной обмотки, т. е. компенсирует МДС вторичной обмотки. Это обуславливает неизменность магнитного потока трансформатора. Векторная диаграмма идеализированного трансформатора, работающего под нагрузкой, показана на рис. 2.22, в. Мощность нагрузочной со-

ставляющей первичного тока равна мощности, отдаваемой трансформатором нагрузке, так как

$$I_1 E_1 \cos \varphi_2 = I_2 (w_2/w_1) E_2 (w_1/w_2) \cos \varphi_2 = I_2 E_2 \cos \varphi_2.$$

Следовательно, *нагрузочная составляющая тока I_1 не только уравнивает МДС вторичной обмотки, но и обеспечивает поступление в трансформатор из сети мощности, отдаваемой приемнику электрической энергии, подключенному к вторичной обмотке.*

Основные закономерности работы идеализированного трансформатора справедливы и для реальных трансформаторов.

2.6 Намагничивающий ток и ток холостого хода

Намагничивающий ток. Величина и форма тока холостого хода определяются магнитным потоком трансформатора и свойствами его магнитной системы. Выше показано, что магнитный поток изменяется во времени синусоидально: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, а его амплитуда определяется ЭДС:

$$\Phi_m = E_1 / (4,44 f w_1). \quad (2.15)$$

Так как при холостом ходе ЭДС практически равна напряжению, то *значение магнитного потока определяется напряжением первичной обмотки, ее числом витков и частотой.*

Свойства магнитной системы трансформатора описываются в основном магнитной характеристикой, представляющей собой графическое изображение зависимости магнитного потока Φ от МДС трансформатора F или намагничивающего тока I_μ , пропорционального МДС. Свойства электрических машин часто изображаются графически, так как многие зависимости, и в первую очередь магнитная характеристика, имеют весьма сложное аналитическое выражение.

Магнитная характеристика трансформатора, как и других машин переменного тока, дает связь между амплитудными или мгновенными значениями потока и МДС. Зависимость потока от тока можно получить экспериментально или расчетно. При проектировании последний путь является единственным.

Магнитную цепь трансформатора рассчитывают на основе закона полного тока. Для замкнутого контура магнитной цепи однофазного трансформатора (см. рис. 2.1) имеем

$$F = F_{\text{ст}} + F_{\text{я}} + F_{\text{з}} \quad (2.16)$$

где $F_{\text{ст}} = H_{\text{ст}}l_{\text{ст}}$, $F_{\text{я}} = H_{\text{я}}l_{\text{я}}$, $F_{\text{з}} = H_{\text{з}}l_{\text{з}}$ — магнитные напряжения в стержнях, ярмах и стыках, $H_{\text{ст}}$, $H_{\text{я}}$ и $H_{\text{з}}$ — напряженности магнитного поля на этих участках магнитной системы, $l_{\text{ст}}$, $l_{\text{я}}$ и $l_{\text{з}}$ — средние длины магнитных линий.

Напряженности магнитного поля $H_{\text{ст}}$ и $H_{\text{я}}$ определяют в зависимости от магнитных индукций в стержнях и ярмах по экспериментальным данным для электротехнических сталей, из которых выполнены эти участки магнитной цепи.

Для примера в табл. 2.1 показана зависимость $H = f(B)$ для электротехнической холоднокатаной стали марки 3413 при постоянном токе и переменном токе частотой 50 Гц.

В расчетных участках магнитопровода магнитная индукция $B = \Phi/S$, где S — площадь поперечного сечения данного участка магнитопровода. Длину магнитной линии принимают равной средней длине данного участка (стержня или ярма).

Для магнитопровода, собранного “впереплет” (см. рис. 2.5), зазор между стыками листов составляет около 0,5 мм. Однако конструктивно каждый стык перекрывается листом стали, и в зазоре между стержнем и ярмом магнитный поток частично замыкается по воздуху, а частично по стали. Поэтому магнитное напряжение $H_{\text{з}}l_{\text{з}}$ в стыках определяют по заводским экспериментальным данным, полученным для трансформаторов, сходных по конструкции и технологии изготовления.

Задаваясь значениями магнитного потока 25, 50, 75, 100 и 125 % от номинального значения, определяют индукцию на отдельных участках, по которым находят напряженности магнитного поля $H_{\text{ст}}$, $H_{\text{я}}$ и $H_{\text{з}}$, а затем по формуле (2.16) — МДС, соответствующую выбранному значению магнитного потока.

Таблица 2.1

Наименование	Значение величин										
B , Тл . . .	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
H , А/см . .	0,13	0,18	0,30	0,54	1,24	1,80	2,55	3,8	5,2	7,2	12,0

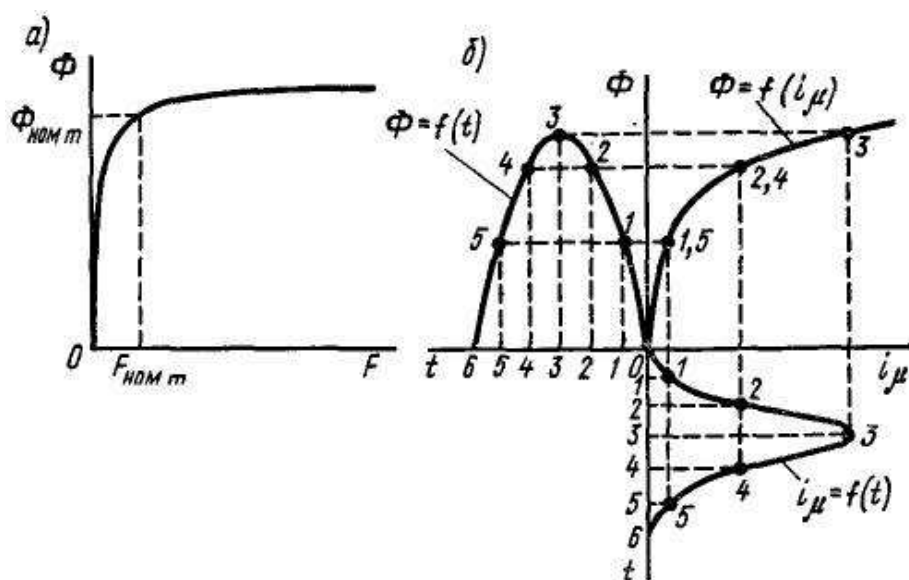


Рис. 2.23 - Магнитная характеристика трансформатора и построение кривой намагничивающего тока

По полученным точкам строят магнитную характеристику трансформатора $\Phi = f(F)$. Отличительной особенностью этой кривой (рис. 2.23, а) является то, что в ней практически отсутствует начальный линейный участок, типичный для других электрических машин.

Величину и форму кривой намагничивающего тока трансформатора легко определить графически (рис. 2.23, б). В левом верхнем квадранте изображена синусоидальная кривая изменения магнитного потока во времени, а в правом верхнем - кривая намагничивания трансформатора, в которой МДС заменена пропорциональным ей током $i_\mu = F/w_1$.

В правом нижнем квадранте показана искомая зависимость изменения во времени намагничивающего тока. Чтобы построить ее по кривой намагничивания для моментов времени 0, 1, 2, 3, 4, 5 и 6, определяют значения намаг-

намагничивающего тока i_μ , соответствующие мгновенным значениям магнитного потока. Эта кривая несинусоидальна, так как зависимость между током i_μ и потоком Φ нелинейна. Чем сильнее насыщение магнитной системы, тем больше выражена несинусоидальность намагничивающего тока.

Для примера на рис. 2.24, *а*, *б* и *в* показаны графики намагничивающего тока реального трансформатора при трех различных значениях магнитного потока, которым соответствуют максимальные индукции $B_m = 1,0; 1,4$ и $2,0$ Тл. Из графиков видно, что с увеличением индукции резко возрастает амплитуда намагничивающего тока и содержание высших гармонических составляющих, из которых наиболее ярко выражены третья и пятая. Амплитуда третьей гармонической составляющей $i_{\mu 3}$ при $B_m = 1,0$ Тл на уровне около 21 % от амплитуды основной гармонической; при $B_m = 1,4$ она увеличивается до 27,5 %, а при $B_m = 2,0$ — до 69 %. Аналогично увеличивается пятая гармоническая $i_{\mu 5}$ — соответственно 5,34, 11,5 и 35,5 %.

Действующее значение намагничивающего тока

$$\begin{aligned} I_\mu &= \sqrt{I_{\mu 1}^2 + I_{\mu 3}^2 + I_{\mu 5}^2 + I_{\mu 7}^2 + \dots} = \\ &= I_{\mu 1} \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \dots} = k_d I_{\mu 1}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ — коэффициенты, показывающие относительное содержание высших гармонических в кривой тока.

Для практических расчетов можно ограничиться учетом третьей и пятой гармонических. Зависимости коэффициентов α и β для этих гармонических и коэффициента k_d от максимальной индукции B_m в магнитопроводе приведены ниже

Индукция B_m , Тл	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Коэффициент α	0,21	0,23	0,28	0,34	0,48	0,69
Коэффициент β	0,05	0,08	0,12	0,18	0,24	0,36
Коэффициент k_d	1,02	1,03	1,04	1,07	1,14	1,27

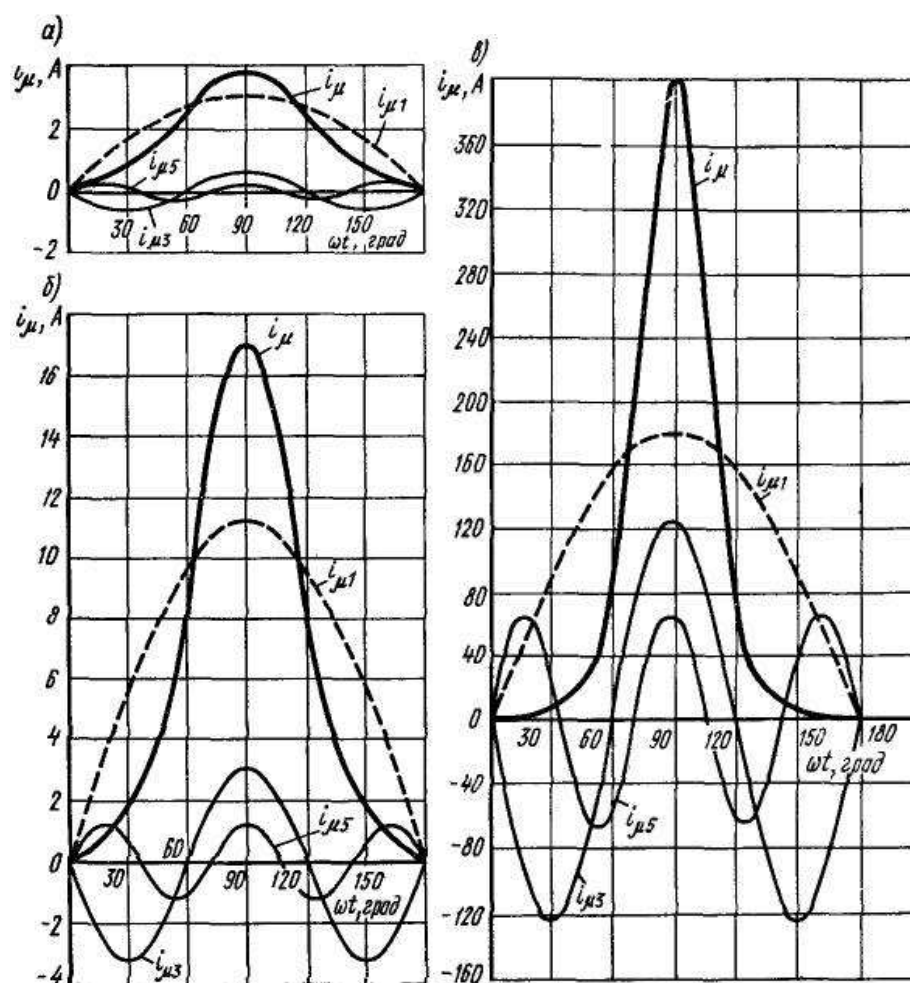


Рис. 2.24 - Кривые намагничивающего тока при различных значениях индукции в магнитопроводе

Следовательно, при индукциях $B_m = 1,6$ ч $1,65$ Тл, применяемых обычно в магнитопроводах из холоднокатаных сталей, можно принять $I_\mu \approx I_{\mu 1}$, т. е. считать действующее значение намагничивающего тока равным действующему значению его первой гармонической. Это позволяет изображать вектором намагничивающий ток \dot{I}_μ на диаграмме трансформатора.

Приближенно действующее значение намагничивающего тока можно получить, разложив кривую тока в ряд Фурье и определив его основную гармоническую.

Более точно значение намагничивающего тока можно получить из формулы

$$I_{\mu_m} = \sqrt{2}(I_{\mu 1} + I_{\mu 3} + I_{\mu 5} + I_{\mu 7} + \dots) = \sqrt{2}I_{\mu 1}(1 + \alpha + \beta + \gamma + \dots),$$

откуда

$$I_{\mu 1} = \frac{I_{\mu m}}{\sqrt{2}(1 + \alpha + \beta + \gamma + \dots)}$$

или с учетом (2.17)

$$\begin{aligned} I_{\mu} &= I_{\mu 1} \sqrt{1 + \alpha + \beta + \gamma + \dots} = \\ &= \left(\frac{I_{\mu m}}{\sqrt{2}} \right) \frac{\sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \dots}}{1 + \alpha + \beta + \gamma + \dots}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

Иногда в справочной литературе кривую намагничивания стали изображают не в виде $B_m = f(H_m)$, а в виде $B_m = f(H_{\text{эКВ}})$, где $H_{\text{эКВ}}$ - действующее значение напряженности. Это позволяет сразу находить ток $I_{\mu} = \Sigma(H_{\text{эКВ}}l)/w_1$, не производя разложения кривой тока в ряд Фурье.

Активная составляющая тока холостого хода. *Намагничивающий ток I_m является главной составляющей тока холостого хода трансформатора I_0 . Этот ток является реактивным, т. е. $I_{\mu} = I_{0p}$. Однако реальный трансформатор в режиме холостого хода потребляет от источника переменного тока некоторую активную мощность, так как при переменном магнитном потоке в стальном магнитопроводе возникают потери энергии от гистерезиса и вихревых токов (магнитные потери ΔP_m). Поэтому ток холостого хода I_0 должен иметь еще и активную составляющую $I_{0a} = \Delta P_m / U_1$ которая обеспечивает поступление в первичную обмотку мощности, компенсирующей магнитные потери (электрическими потерями в первичной обмотке в этом режиме можно пренебречь из-за малости тока холостого хода). Следовательно, ток холостого хода*

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{\mu} + \dot{I}_{0a} \text{ или } I_0 = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{0a}^2}. \quad (2.19)$$

Обычно при выполнении магнитопровода трансформатора из листовой электротехнической стали толщиной 0,28—0,50 мм и частоте 50 Гц активная составляющая тока I_{0a} не превышает 10% от тока I_0 , поэтому она оказывает весьма малое влияние на значение тока холостого хода (изменяет его не более чем на 1 %). Форма кривой тока холостого хода определяется в основном кривой намагничивающего тока.

При расчете магнитных потерь ΔP_m обычно используют приведенные в

ГОСТах данные о величине полных потерь p_0 в килограмме стали данной марки (без разделения их на потери от вихревых токов и гистерезиса) в зависимости от значения индукции при определенных стандартной частоте и толщине листов. Полные потери в стали магнитопровода трансформатора $\Delta P_m = k_{доб}(p_{ст}M_{ст} + p_{я}M_{я})$, где $k_{доб}$ - коэффициент, учитывающий увеличение потерь вследствие обработки стали, неравномерного распределения индукции на данном участке, несинусоидальности изменения индукции во времени и других факторов; $p_{ст}$ и $p_{я}$ — удельные потери в 1 кг стали стержней и ярма; $M_{ст}$ и $M_{я}$ — массы стержней и ярм.

Для примера в табл. 2.2 приведены значения этих потерь для холоднокатаной стали марки 3413 при частоте 50 Гц и толщине листов 0,35 мм.

Таблица 2.2

Индукция, Тл	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Удельные потери, Вт/кг	0,50	0,60	0,71	0,83	0,97	1,13	1,30	1,55	1,90	2,38

В холоднокатаных сталях потери минимальны, когда направление магнитного потока совпадает с направлением прокатки. Различия в этих направлениях приводит к резкому возрастанию потерь p_0 . Так, например, если угол между этими направлениями составляет $\alpha = 20^\circ$, то потери возрастают на 30%, при $\alpha = 40^\circ$ – на 100% и при $\alpha = 60^\circ$ – на 140%. Это требует применять в силовых трансформаторах магнитопроводы с косыми стыками, а в трансформаторах малой мощности навивать магнитопроводы из стальной ленты.

2.7 Комплексные уравнения и векторная диаграмма

В реальном трансформаторе помимо основного магнитного потока Φ , замыкающегося по стали и сцепленного со всеми обмотками трансформатора, имеются также потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 2.25), которые сцеплены только с одной из обмоток. Потоки рассеяния не участвуют в передаче энер-

гии, но создают в каждой из обмоток соответствующие ЭДС самоиндукции $E_{\sigma 1} = 4,44 f w_1 \Phi_{\sigma 1m}$; $E_{\sigma 2} = 4,44 f w_2 \Phi_{\sigma 2m}$.

С учетом ЭДС самоиндукции и падений напряжения в активных сопротивлениях обмоток можно составить комплексные уравнения для первичной и вторичной обмоток трансформатора. С учетом (2.13) получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} &= \dot{I}_1 R_1 ; \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} &= \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_H ; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2 w_2 / w_1) \end{aligned} \right\} , \quad (2.20)$$

где \underline{Z}_H — сопротивление нагрузки, подключенной к трансформатору.

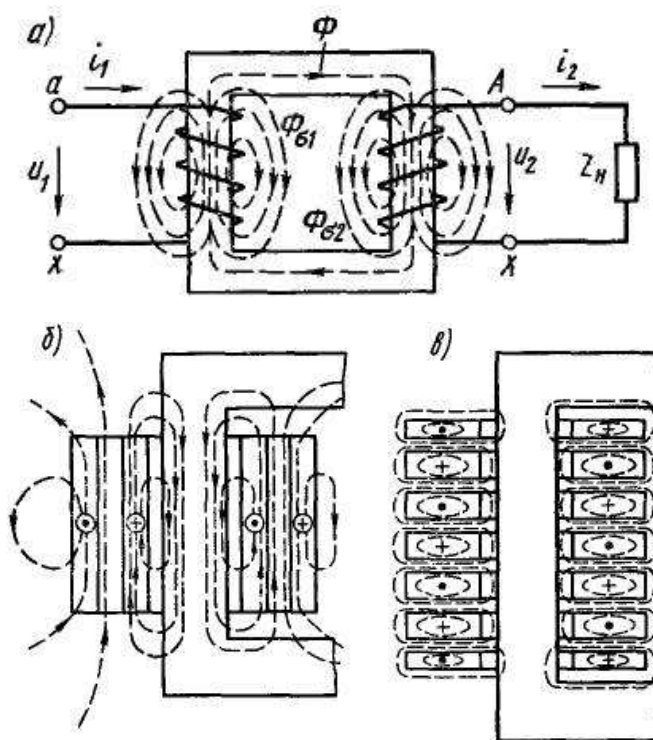


Рис. 2.25 - Схема магнитных потоков в трансформаторе (а) и распределение потоков рассеяния при концентрической (б) и чередующейся (в) обмотках

Поскольку потоки рассеяния полностью или частично замыкаются по воздуху, они пропорциональны МДС соответствующих обмоток или соответствующим токам:

$$E_{\sigma 1} = I_1 X_1 ; E_{\sigma 2} = I_2 X_2 . \quad (2.21)$$

Величины X_1 и X_2 называют индуктивными сопротивлениями обмоток

трансформатора, обусловленными потоками рассеяния.

Так как векторы ЭДС $\dot{E}_{\sigma 1}$ и $\dot{E}_{\sigma 2}$ отстают от соответствующих потоков и токов на 90° , то

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_1 ; \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_2 . \quad (2.22)$$

При этом комплексные уравнения трансформатора примут вид

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = \dot{I}_1 \underline{Z}_1 ; \quad (2.23)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_H = \dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_H ; \quad (2.24)$$

$$\dot{I}_1 + (-\dot{I}_2 w_2 / w_1) = \dot{I}_0 . \quad (2.25)$$

Замена ЭДС $\dot{E}_{\sigma 1}$ и $\dot{E}_{\sigma 2}$ падениями напряжений $-j\mathcal{E}_1 X_1$ и $-j\mathcal{E}_2 X_2$ наглядно показывает роль потоков рассеяния: *они создают индуктивные падения напряжения в обмотках, не участвуя в передаче энергии из одной обмотки в другую*. Проще становится и построение векторной диаграммы, соответствующей системе уравнений (2.23) – (2.25), в которой целесообразно также заменить падение напряжения в нагрузке

величиной $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_H$, т. е. вторичным напряжением трансформатора, определяемым из (2.24):

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2 . \quad (2.26)$$

Векторную диаграмму вторичной обмотки трансформатора (рис. 2.26, а) строят согласно уравнению (2.26). Характер диаграммы определяется током нагрузки \mathcal{E}_2 , который принимается заданным по величине и фазе. Иными словами, задаваясь векторами вторичных тока \mathcal{E}_2 и напряжения \mathcal{U}_2 , можно построить вектор ЭДС

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 ; \quad (2.27)$$

если известны параметры трансформатора. Вектор $\mathcal{E}_2 R_2$ параллелен вектору тока \mathcal{E}_2 , а вектор $j\mathcal{E}_2 X_2$ опережает вектор тока \mathcal{E}_2 на угол 90° . На диаграмме изображен и вектор магнитного потока Φ_m , который опережает вектор ЭДС \dot{E}_2 на 90° . Векторную диаграмму первичной обмотки трансформатора (рис.

2.26, б) строят в соответствии с уравнением

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1. \quad (2.28)$$

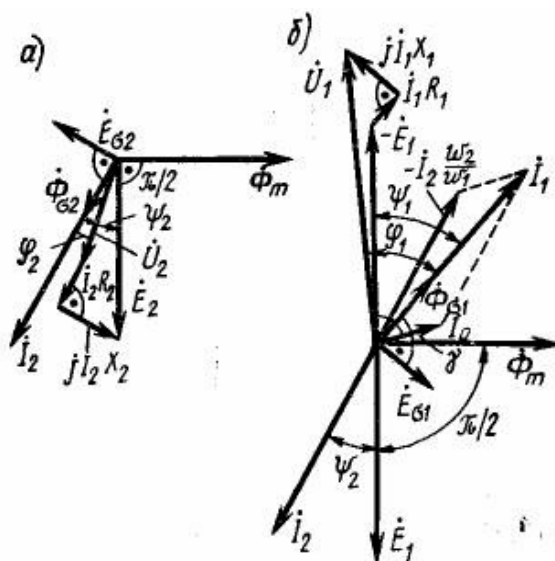


Рис. 2.26 - Векторные диаграммы обмоток трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Построение диаграммы начинают с вектора потока $\dot{\Phi}_m$, который создается током холостого хода \mathcal{E}_0 , этот ток опережает вектор потока $\dot{\Phi}_m$ на угол $\gamma=5^\circ$. Вектор ЭДС \dot{E}_1 , как и \dot{E}_2 , отстает от потока $\dot{\Phi}_m$ на угол 90° . Ток в первичной обмотке трансформатора $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2 w_2 / w_1)$, поэтому на рис. 2.26, б) нужно показать и вектор тока \dot{I}_2 , сдвинутый на угол ψ_2 относительно вектора \dot{E}_1 (векторы \dot{E}_1 и \dot{E}_2 совпадают по направлению). Зная \mathcal{E}_2 , можно изобразить вектор

$-\mathcal{E}_2 w_2 / w_1$ и получить вектор \mathcal{E}_1 , как сумму векторов \mathcal{E}_0 и $-\mathcal{E}_2 w_2 / w_1$.

Найдя вектор тока \mathcal{E}_1 , можно определить значения векторов $\mathcal{E}_1 R_1$ и $j\mathcal{E}_1 X_1$ и построить искомый вектор напряжения U_1 как сумму трех составляющих: векторов $-\dot{E}_1$ и падений напряжений в обмотках $\dot{E}_1 R_1$ и $j\mathcal{E}_1 X_1$.

Целесообразнее строить общую диаграмму трансформатора для его первичной и вторичной обмоток (рис. 2.27, а, б), хотя эти обмотки и не связаны между собой электрически.

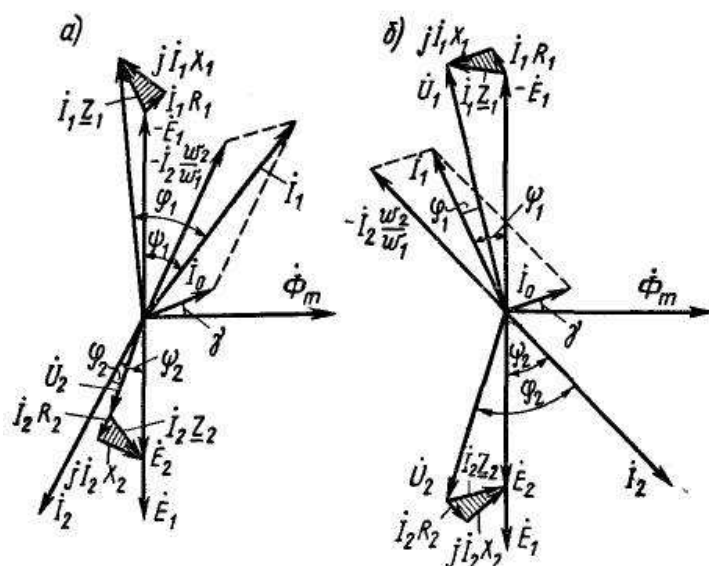


Рис. 2.27 - Полные векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

2.8 Схема замещения трансформатора

Составление схемы замещения. Систему уравнений (2.23) — (2.25), описывающую электромагнитные процессы в трансформаторе, можно свести к одному уравнению, если учесть, что $E_1 = kE_2$, и положить

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_0 \underline{Z}_m = \dot{I}_0 (R_m + jX_m). \quad (2.29)$$

При этом параметры R_m и X_m следует выбрать так, чтобы в режиме холостого хода, когда ЭДС E_1 практически равна номинальному напряжению U_1 , ток

$$\dot{I}_0 = \dot{E}_1 / (R_m + jX_m) = \dot{E}_1 / \underline{Z}_m \quad (2.30)$$

по модулю равнялся бы действующему значению тока холостого хода, а мощностью $I_0 E_1 \cos \varphi_0 = I_0^2 R_m$ — мощности, забираемой трансформатором из сети при холостом ходе.

Решим систему уравнений (2.23) – (2.25) относительно первичного тока

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1 + [\underline{Z}_m (k^2 \underline{Z}_n + k^2 \underline{Z}_2)] / [\underline{Z}_m + (k^2 \underline{Z}_n + k^2 \underline{Z}_2)]} = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{\text{эkv}}} \quad (2.31)$$

В соответствии с уравнением (2.31) трансформатор можно заменить электрической схемой, по которой можно определить токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , мощность P_1 , забираемую из сети, мощность потерь ДС и т. п. Такую электрическую

схему называют *схемой замещения трансформатора* (рис. 2.28).

Эквивалентное сопротивление этой схемы

$$\underline{Z}_{\text{экв}} = \underline{Z}_1 + [\underline{Z}_m (\underline{Z}'_n + \underline{Z}'_2)] / [\underline{Z}_m + (\underline{Z}'_n + \underline{Z}'_2)] , \quad (2.32)$$

где

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 ;$$

$$\underline{Z}_m = R_m + jX_m ;$$

$$\underline{Z}'_2 = k^2 \underline{Z}_2 = k^2 (R_2 + jX_2) ;$$

$$\underline{Z}'_n = k^2 \underline{Z}_n .$$

Схема замещения трансформатора представляет собой сочетание двух схем замещения — первичной и вторичной обмоток, которые соединены между собой в точках *a* и *б*.

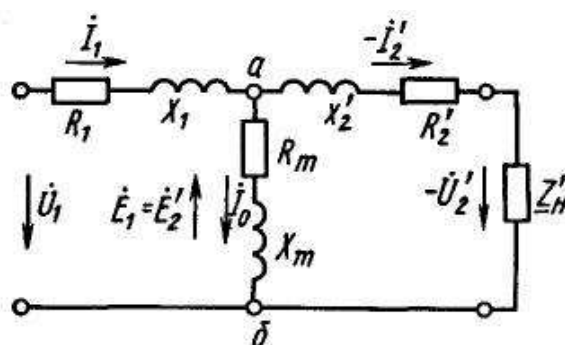


Рис. 2.28 - Схема замещения трансформатора

В цепи первичной обмотки включены сопротивления R_1 и X_1 , а в цепи вторичной обмотки — сопротивления R'_2 и X'_2 . Участок схемы замещения между точками *a* и *б*, по которому проходит ток I_0 , называют *намагничивающим контуром*. На вход схемы замещения подают напряжение \dot{U}_1 , к выходу ее подключают переменное сопротивление нагрузки \underline{Z}'_n , к которому приложено напряжение — \dot{U}'_2 .

Сопротивления \underline{Z}'_n (и его составляющие $R'_2 = R_2 k^2$ и $X'_2 = X_2 k^2$), а также \underline{Z}'_n называют соответственно *сопротивлениями вторичной обмотки и нагрузки, приведенными к первичной обмотке*. Аналогично приведенными называют значения ЭДС и тока: $E'_2 = kE_2 = E_1$; $I'_2 = I_2 / k$.

Полная мощность *приведенного контура вторичной обмотки* в схеме

замещения равна мощности вторичной обмотки реального трансформатора: $I_2' E_2' = (I_2/k) E_2 k = I_2 E_2$, а мощность электрических потерь в приведенном вторичном контуре этой схемы равна мощности потерь во вторичной обмотке реального трансформатора: $I_2'^2 R_2' = (I_2/k)^2 R_2 k^2 = I_2^2 R_2$.

Относительные падения напряжений в активном и индуктивном сопротивлениях приведенного вторичного контура также остаются неизменными, как и в реальном трансформаторе :

$$I_2' R_2' / E_2' = (I_2 / k) k^2 R_2 / (k E_2) = I_2 R_2 / E_2 ;$$

$$I_2' X_2' / E_2' = (I_2 / k) k^2 X_2 / (k E_2) = I_2 X_2 / E_2 .$$

Физически переход от реального трансформатора к имитирующей его электрической схеме замещения можно наглядно представить состоящим из четырех этапов (рис. 2.29).

1-й этап. Реальный трансформатор заменяют идеализированным трансформатором Tr , в цепь первичной обмотки которого включают сопротивления R_1 и X_1 , а в цепь вторичной обмотки - R_2 и X_2 (рис. 2.29, а).

2-й этап. Параметры вторичной обмотки приводят к параметрам первичной, в результате чего ЭДС обмоток оказываются равными: $E_1 = E_2$.

3-й этап. Соединяют эквипотенциальные точки a и a' ; b и b' (рис. 2.29, б).

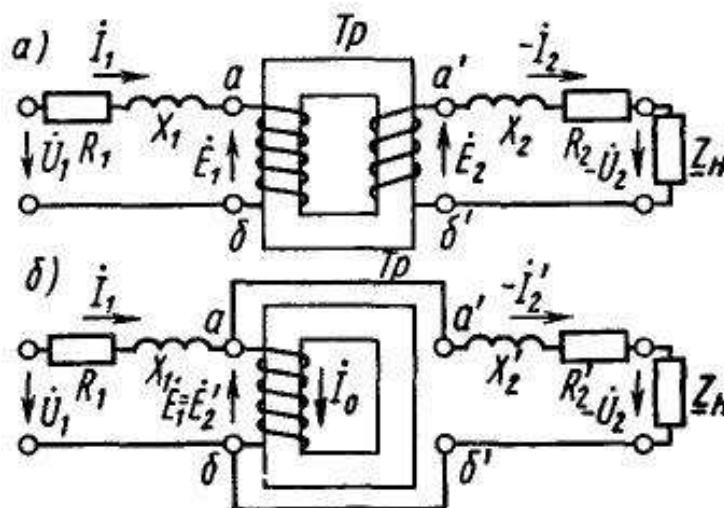


Рис. 2.29 - Эквивалентные схемы для приведения вторичной обмотки к первичной

4-й этап. Включают дополнительный намагничивающий контур, по которому проходит составляющая \dot{I}_0 первичного тока.

На практике приводят как вторичную обмотку к первичной, так и первичную ко вторичной, в зависимости от того, какие процессы интересуют инженера. Отметим, что параметры схемы замещения можно считать постоянными только при небольших изменениях первичного напряжения, т. е. в пределах $\pm 10\%$. Это в первую очередь относится к намагничивающему контуру с сопротивлением $\underline{Z}_m = R_m + jX_m$, параметры которого определяют ток \mathcal{E}_0 . С увеличением напряжения происходит насыщение стали магнитопровода, вследствие чего уменьшается величина X_m (намагничивающий ток резко возрастает).

Определение параметров схемы замещения. Параметры схемы замещения для любого трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода и короткого замыкания (рис. 2.30).

Опыт холостого хода. К зажимам одной из обмоток посредством регулятора напряжения (*РН*) (рис. 2.30, *а*) подводят номинальное напряжение $U_0 = U_{\text{ном}}$; к другой обмотке подключают вольтметр (ее можно считать разомкнутой). Измерив ток холостого хода I_0 и мощность P_0 , потребляемую трансформатором, согласно схеме замещения (рис. 2.31, *а*) находим

$$\left. \begin{aligned} Z_1 + Z_m &= U_0 / I_0; R_1 + R_m = P_0 / I_0^2; \\ X_1 + X_m &= \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями $\mathcal{D}C_{\text{эл}} = I_0^2 R_1$ пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода. При этом

$$P_0 = I_0^2 (R_1 + R_m) \approx I_0^2 R_m, \quad (2.34)$$

откуда $R_m = P_0 / I_0^2$.

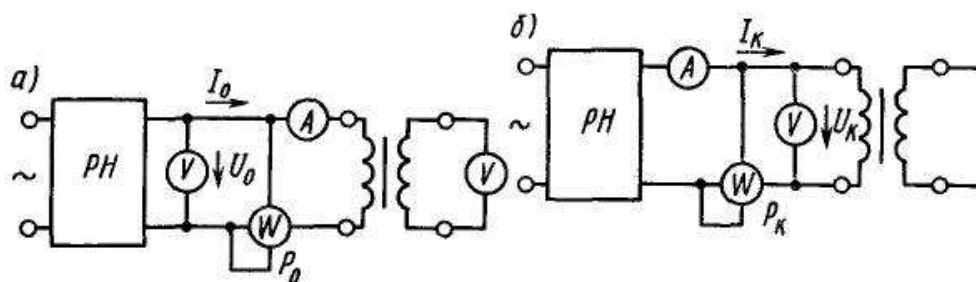


Рис. 2.30 - Схемы проведения опытов холостого хода и короткого замыкания

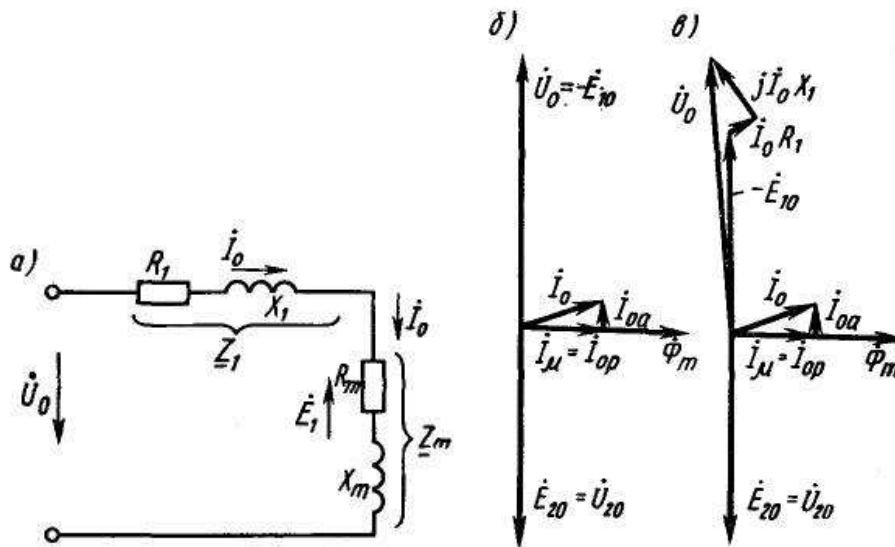


Рис. 2.31 - Схема замещения трансформатора и его векторные диаграммы для режима холостого хода

Аналогично считают, что $X_1 + X_m \approx X_m$, так как сопротивление X_m определяется основным потоком трансформатора Φ (потоком взаимоиנדукции), а X_1 — потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, который во много раз меньше Φ . Поэтому с большой степенью точности полагают, что

$$Z_m = U_0 / I_0 ; X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} . \quad (2.35)$$

Измерив напряжения U_0 и U_{20} первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

$$k = U_0 / U_{20} . \quad (2.36)$$

Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода, построенная исходя из указанных выше допущений, изображена на рис. 2.31, б. В действительности ток I_0 создает в первичной обмотке падение напряжения $I_0 R_1$ и $j I_0 X_1$ поэтому $\dot{U}_0 = -\dot{E}_{10} + \dot{I}_0 R_1 + j \dot{I}_0 X_1$.

Соответствующая векторная диаграмма показана на рис. 2.31, в.

Опыт короткого замыкания. Вторичную обмотку замыкают накоротко (сопротивление $Z_n = 0$), а к первичной посредством регулятора напряжения РН подводят пониженное напряжение U_k (см. рис. 2.30, б) такого значения, при котором по обмоткам проходит номинальный ток $I_{ном}$. В мощных силовых трансформаторах напряжение U_k при коротком замыкании обычно составляет

5—15% от номинального. В трансформаторах малой мощности напряжение U_k может достигать 25-50% от $U_{ном}$.

Так как поток, замыкающийся по стальному магнитопроводу, зависит от напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора, а магнитные потери в стали пропорциональны квадрату индукции, т. е. квадрату магнитного потока, то ввиду малости U_k пренебрегают магнитными потерями в стали и током холостого хода. При этом из общей схемы замещения трансформатора исключают сопротивления R_m и X_m и преобразуют ее в схему, показанную на рис. 2.32, а. Параметры этой схемы определяют из следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= Z_1 + Z'_2 = U_k / I_{ном}; \\ R_k &= R_1 + R'_2 = P_k / I_{ном}^2; \\ X_k &= X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \end{aligned} \right\}; \quad (2.37)$$

Разделить Z_k на составляющие Z_1 и Z'_2 довольно трудно. Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая $Z_1 = Z'_2 = 0,5Z_k$. Это допущение близко к действительности и не вносит ощутимых погрешностей в расчеты. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании показана на рис. 2.32, б.

Треугольник ABC , образуемый векторами активного, реактивного и полного падений напряжения, называют *треугольником короткого замыкания или характеристическим треугольником*.

При изменении режима работы трансформатора (тока нагрузки) катеты характеристического треугольника изменяются пропорционально изменению тока. Это позволяет, как показано ниже, очень просто перестраивать векторные диаграммы для упрощенной схемы замещения трансформатора и производить количественные расчеты. Катеты BC и AC называют соответственно *реактивной и активной составляющими напряжения короткого замыкания*.

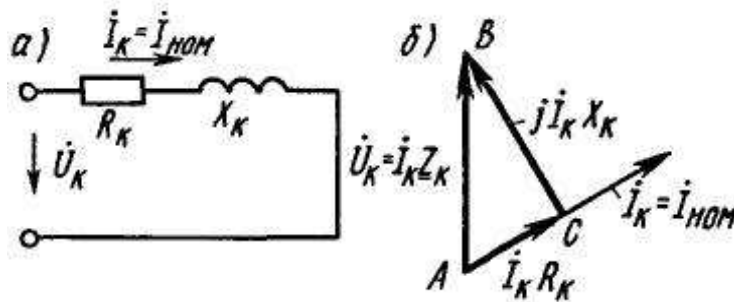


Рис. 2.32 - Схема замещения трансформатора и его векторная диаграмма для режима короткого замыкания

В ГОСТах и паспортах трансформаторов указывают относительное напряжение короткого замыкания при номинальном токе в процентах от номинального напряжения:

$$u_K = (I_{ном} Z_K / U_{ном}) 100 . \quad (2.38)$$

Аналогично можно выразить относительные значения его активной и реактивной составляющих (в %):

$$u_{K.a} = (I_{ном} R_K / U_{ном}) 100 ; u_{K.p} = (I_{ном} X_K / U_{ном}) 100 . \quad (2.39)$$

При этом

$$u_{K.a} = u_K \cos \varphi_K ; u_{K.p} = u_K \sin \varphi_K ; u_K = \sqrt{u_{K.a}^2 + u_{K.p}^2} . \quad (2.40)$$

При расчете параметров трансформатора по (2.37) не имеет значения, на какой из обмоток проводится опыт короткого замыкания. Обычно его удобнее проводить, замыкая накоротко обмотку с меньшим числом витков, но вообще следует исходить из удобства подбора приборов и обеспечения условий техники безопасности.

По известному значению u_K можно определить установившийся ток короткого замыкания в реальных условиях эксплуатации (при номинальном напряжении):

$$I_K = U_{ном} / Z_K = U_{ном} / [u_K U_{ном} / (100 I_{ном})] = 100 I_{ном} / u_K . \quad (2.41)$$

Обычно в силовых трансформаторах большой и средней мощности значение u_K составляет 5 — 15%. Поэтому ток короткого замыкания в них в 7 — 20 раз превышает номинальный. Как правило, чем больше мощность и напряжение силового трансформатора, тем выше напряжение короткого замыкания u_K (%).

2.9 Изменение вторичного напряжения и внешние характеристики

Изменение напряжения. Поскольку ток холостого хода в силовых трансформаторах большой и средней мощности сравнительно мал (0,5 — 3 % от номинального), во многих случаях при расчетах используют упрощенную схему замещения (рис. 2.33, а) без намагничивающего контура. В этой схеме активные сопротивления R_1 и R'_2 первичной и вторичной обмоток соединены последовательно и образуют результирующее активное сопротивление $R_k = R_1 + R'_2$. Аналогично индуктивные сопротивления X_1 и X'_2 образуют результирующее индуктивное сопротивление $X_k = X_1 + X'_2$. Погрешность в определении первичного тока, вызванная таким упрощением, при нагрузках, близких к номинальной, составляет примерно 0,1 %, что вполне допустимо.

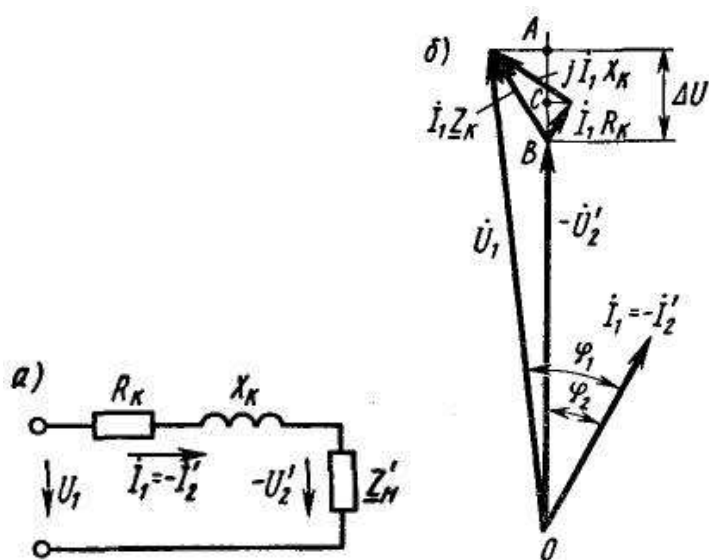


Рис. 2.33 - Упрощенная схема замещения трансформатора и ее векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке

Для упрощенной схемы замещения можно построить векторную диаграмму (рис. 2.33, б). В этой диаграмме вектор $\dot{U}_1 R_k$ представляет собой результирующее активное падение напряжения в приведенном трансформаторе, вектор $j\dot{U}_1 X_k$ — результирующее реактивное падение напряжения, а вектор $\dot{U}_1 Z_k$ — результирующее полное падение напряжения. При этом

$$\dot{U}_1 Z_k = \dot{U}_1 R_k + j\dot{U}_1 X_k . \quad (2.42)$$

Если известны значения $u_{к.а}$, $u_{к.р}$ и u_k , то полное падение напряжения в

трансформаторе и его активная и реактивная составляющие:

$$\dot{I}_1 Z_K = \beta u_K U_{ном} / 100 ; \dot{I}_1 R_K = \beta u_{K.a} U_{ном} / 100 ; \dot{I}_1 X_K = \beta u_{K.p} U_{ном} / 100 ,$$

где $\beta = I_2 / I_{2ном} \approx I_1 / I_{1ном}$ - коэффициент нагрузки.

Векторная диаграмма, представленная на рис. 2.33, б, позволяет также определить изменение напряжения трансформатора в зависимости от нагрузки. Обычно его рассчитывают при постоянном значении $U_1 = U_{1ном}$ и номинальной частоте $f_{ном}$ как отношение алгебраической разности значений вторичного напряжения при холостом ходе U_{20} и нагрузке U_2 к напряжению U_{20} при холостом ходе и выражают в процентах:

$$\Delta u = (U_{20} - U_2) 100 / U_{20} = (U'_{20} - U'_2) 100 / U'_{20} . \quad (2.43)$$

Так как при холостом ходе отсутствуют падения напряжения в обмотках трансформатора, то $U'_{20} = U_1$ и при номинальном значении $U_1 = U_{1ном}$

$$\Delta u = [(U_{1ном} - U'_2) / U_{1ном}] 100 . \quad (2.44)$$

Из диаграммы (рис. 2.33, б), следует, что из-за малости угла φ_1 — φ_2 за модуль вектора U_1 приближенно можно принять его проекцию на направление вектора — U'_2 , т. е. отрезок \overline{OA} . Тогда $DU = U_1 - U'_2 = \overline{OA} - \overline{OB} = \overline{BA}$.

Спроектировав аналогично векторы $\mathcal{E}_1 R_K$ и $j\mathcal{E}_1 X_K$ на направление вектора \mathcal{U}'_2 , получим:

$$DU = \overline{BA} = \overline{BC} + \overline{CA} = I_1 R_K \cos \varphi_2 + I_1 X_K \sin \varphi_2 .$$

Таким образом, относительное изменение напряжения (%)

$$\Delta u = [(I_1 R_K \cos \varphi_2 + I_1 X_K \sin \varphi_2) / U_{ном}] 100 . \quad (2.45)$$

При номинальной нагрузке формула (2.45) принимает вид:

$$\Delta u_{ном} = [(I_{ном} R_K \cos \varphi_2 + I_{ном} X_K \sin \varphi_2) / U_{ном}] 100 \text{ или}$$

$$\Delta u_{ном} = u_{K.a} \cos \varphi_2 + u_{K.p} \sin \varphi_2 .$$

Из (2.45) следует, что *изменение напряжения трансформатора пропорционально току нагрузки $I'_2 \approx I_1$ и зависит от угла φ_2* . Поэтому, используя понятие коэффициента нагрузки

$\beta = I_2 / I_{2ном} \approx I_1 / I_{1ном}$, получаем

$$\Delta u_K = \beta \Delta u_{ном} = \beta (u_{K.a} \cos \varphi_2 + u_{K.p} \sin \varphi_2) . \quad (2.46)$$

Более точная формула, используемая для силовых трансформаторов, имеет вид

$$\Delta u = \beta(u_{\kappa.a} \cos \varphi_2 + u_{\kappa.p} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2(u_{\kappa.p} \cos \varphi_2 - u_{\kappa.a} \sin \varphi_2)^2}{200}. \quad (2.47)$$

Однако и формула (2.46) дает результат, точность которого вполне приемлема в большинстве практически встречающихся случаев.

Внешние характеристики. Зависимость $U_2 = f(I_2)$ или $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$, $f = f_{\text{ном}} = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ называют *внешней характеристикой трансформатора*. Для ее построения можно использовать формулу

$$U'_2 = U_{1\text{ном}}(1 - \Delta u / 100) = U_{1\text{ном}}[1 - \beta(u_{\kappa.a} \cos \varphi_2 + u_{\kappa.p} \sin \varphi_2) / 100 - \beta(u_{\kappa.p} \cos \varphi_2 - u_{\kappa.a} \sin \varphi_2)^2 / 20000]. \quad (2.48)$$

В пределах изменения коэффициента нагрузки в от 0 до 1 внешние характеристики практически прямолинейны (рис. 2.34, а).

Напряжение короткого замыкания u_{κ} его составляющие $u_{\kappa.a}$ и $u_{\kappa.p}$ зависят в определенной степени от номинальной мощности трансформатора. В трансформаторах средней и большой мощности реактивная составляющая напряжения короткого замыкания значительно больше, чем активная.

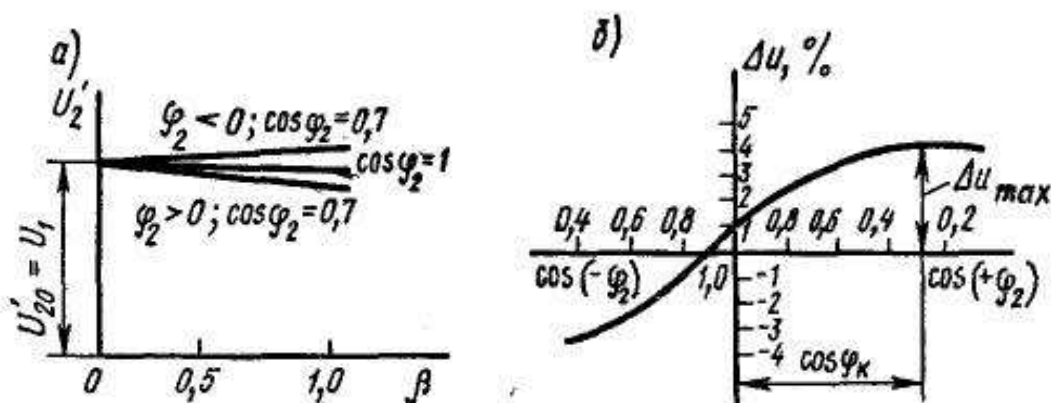


Рис. 2.34 - Внешние характеристики трансформаторов и график изменения Δu

Поэтому в таких трансформаторах *реактивная нагрузка вызывает большее изменение напряжения U'_2 , чем активная*, т. е. чем меньше $\cos \varphi_2$ тем ниже проходит внешняя характеристика и значительнее изменяется напряжение U'_2 . При активно-индуктивной нагрузке всегда напряжение $U'_2 < U_1$; при активно-емкостной нагрузке и некоторых углах φ_2 оно может стать большим

U_1 [в формуле (2.48) при $\psi_2 < 0$ члены, содержащие $\sin \psi_2$, становятся отрицательными]. При заданном значении в относительное изменение напряжения Δu зависит от величины угла ψ_2 . При активной нагрузке величина Δu невелика; при активно-индуктивной нагрузке она возрастает и достигает максимального значения, когда $\psi_2 = \psi_{2k}$; при активно-емкостной нагрузке эта величина может стать отрицательной (рис. 2.34, б).

Характер изменения вторичного напряжения в трансформаторах средней и большой мощности (при $X_k > R_k$) при различных значениях угла ψ_2 показан на рис. 2.35. При $\psi_2 > 0$ (рис. 2.35, а) увеличение нагрузки приводит к довольно быстрому возрастанию алгебраической разности $\Delta U = U_1 - U'_2$. При $\psi_2 = 0$ (рис. 2.35, б) величина ΔU возрастает с увеличением нагрузки в значительно меньшей степени. При $\psi_2 < 0$ (рис. 2.35, в), т. е. когда ток I'_2 опережает напряжение U'_2 (активно-емкостная нагрузка), величина ΔU может изменить свой знак.

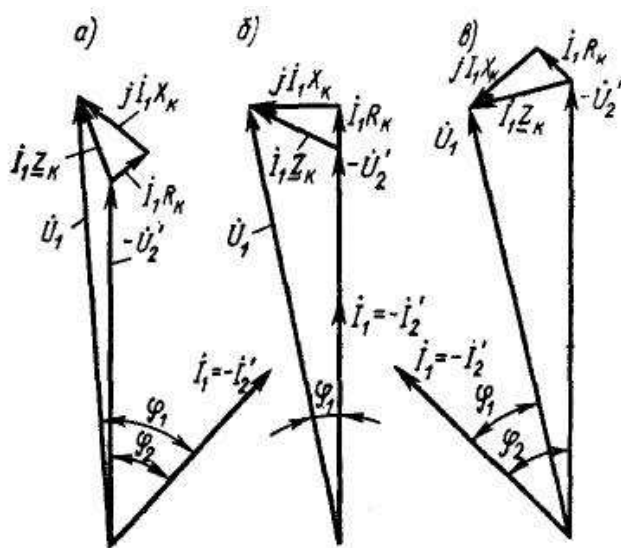


Рис. 2.35 - Упрощенные векторные диаграммы трансформатора при различных значениях угла ψ_2

Изменение вторичного напряжения трансформатора при переменной нагрузке можно определить по диаграммам, приведенным на рис. 2.36. Если $U_1 = \text{const}$ и $\psi_2 = \text{const}$, а изменяется только ток I'_2 (модуль вектора \mathcal{E}'_2), то используется диаграмма (рис. 2.36, а). В этой диаграмме угол $BCE = (\psi_k - \psi_2) = \text{const}$. Как внешний угол треугольника BCA он равен сумме углов ABC и CAB , кото-

рые опираются соответственно на дуги BC и CA . Следовательно, и угол AFB также равен разности $\varphi_k - \varphi_2$, так как он опирается на дугу BCA . При изменении тока нагрузки I'_2 изменяются стороны треугольника падения напряжений BCD и положение векторов $I_1 \underline{Z}_k$ и $-\underline{U}'_2$, но угол $\varphi_k - \varphi_2$ остается неизменным. Следовательно, точка C перемещается по дуге BCA окружности с диаметром $\overline{BF} = U_1 / [\sin(\varphi_k - \varphi_2)]$. Изменение напряжения трансформатора $\Delta U = U_1 - U'_2$ определяется отрезком \overline{CE} , отсекаемым на продолжении вектора $-U'_2$ дугой BE , проведенной из точки A радиусом \overline{AB} .

Если $U_1 = \text{const}$ и $I'_2 = \text{const}$, а изменяется только угол φ_2 , то используется диаграмма (рис. 2.36, б). Для ее построения из точки O проводим полуокружность 1 радиусом $\overline{OB} = U_1$, а из точки O' — полуокружность 2 также радиусом $\overline{O'C} = U_1$.

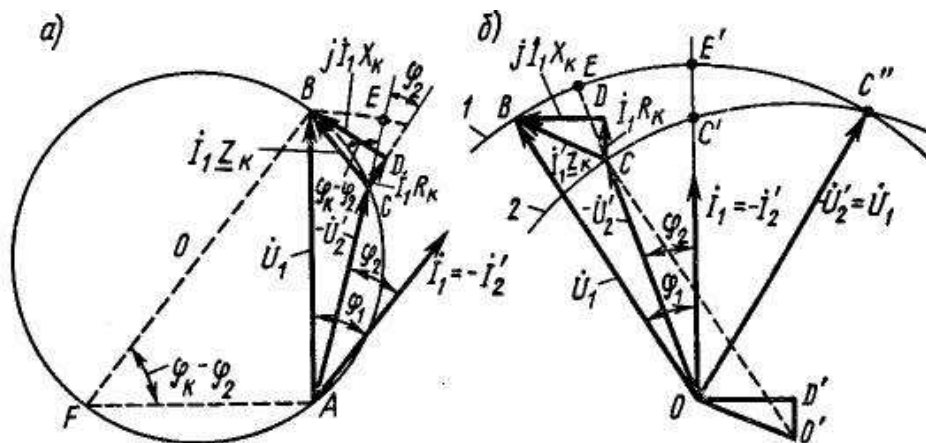


Рис. 2.36 - Круговые диаграммы трансформатора при переменной нагрузке и $f/\omega = \text{const}$:

а) — при $\varphi_2 = \text{const}$ и изменении тока I'_2 ; б) — при $I'_2 = \text{const}$ и изменении φ .

Так как треугольник $OD'O'$ равен треугольнику падений напряжений BCD , то полуокружность 1 представляет собой геометрическое место концов вектора \underline{U}_1 а полуокружность 2 — геометрическое место концов вектора $-\underline{U}'_2$. Отрезки \overline{CE} , расположенные между этими полуокружностями, представляют собой изменения напряжения $\Delta U = U_1 - U'_2$. Точки C и E соответствуют режиму, при котором $\varphi_2 = 0$, части окружностей 1 и 2, расположенные левее этих точек, — углам $\varphi/2 > \varphi_2 > 0$ (активно-индуктивная нагрузка), а части, расположенные правее этих точек, — углам $\varphi/2 < \varphi_2 < 0$ (активно-емкостная

нагрузка). В точке С", соответствующей некоторой активно-емкостной нагрузке, $U_1 = U'_2$ и $DU = 0$. В области правее этой точки $U'_2 > U_1$.

Уменьшение падения напряжения. Наличие индуктивных падений напряжения, вызываемых потоками рассеяния, ведет к нежелательному изменению напряжения трансформатора под нагрузкой. Чтобы уменьшить потоки рассеяния, первичные и вторичные обмотки выполняют на одних и тех же стержнях, по возможности приближая одну обмотку к другой. При концентрической обмотке на характер магнитного поля потоков рассеяния (см. рис. 2.25, б) влияют токи обеих обмоток, и при режимах нагрузки, близких к номинальной, можно считать, что $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_2 w_2 / w_1 \approx \mathcal{E}_2 w_2 / w_1$ т. е. МДС первичной и вторичной обмоток равны по величине и находятся в противофазе. Поэтому *сближение обмоток ведет к уменьшению потоков рассеяния.*

Минимальное расстояние между обмотками ограничивается электрической прочностью изоляционного промежутка. Вследствие этого высоковольтные трансформаторы, в которых изоляционный промежуток больше, имеют относительно большие потоки рассеяния и напряжения короткого замыкания, чем низковольтные трансформаторы. При чередующейся обмотке (рис. 2.25, в) потоки рассеяния несколько больше, чем при концентрической.

2.10 Особенности работы трансформаторов малой мощности

Режим холостого хода. Трансформаторы средней и большой мощности проектируют так, чтобы потребляемая ими из сети реактивная мощность была невелика. При этом ток холостого хода должен быть сравнительно небольшим (обычно он не превышает нескольких процентов от номинального тока). В трансформаторах малой мощности при проектировании решающую роль играет получение минимально возможной массы и объема трансформатора, что приводит к существенному увеличению тока холостого хода. Его значение при частоте 50 Гц и пластинчатых сердечниках достигает 30 - 60 % номинального тока. Увеличению отношения $I_0/I_{\text{ном}}$ способствует также возрастающее влия-

ние магнитного сопротивления в стыках магнитопровода при относительном уменьшении пути магнитного потока по его ферромагнитным элементам.

Зависимость отношения $I_0 / I_{\text{ном}}$ от номинальной мощности можно представить в виде $I_0 / I_{\text{ном}} \approx I_M / I_{\text{ном}} \approx O_M / S_{\text{ном}} \approx q_M M_{\text{ст}} / S_{\text{ном}}$, где $O_M = q_M M_{\text{ст}}$ — намагничивающая мощность; q_M — удельная намагничивающая мощность (на 1 кг массы стали магнитопровода), зависит от индукции в стержнях, ярмах и стыках; $M_{\text{ст}}$ — масса стали магнитопровода.

Номинальная мощность трансформатора $S_{\text{ном}}$ приблизительно пропорциональна четвертой степени линейных размеров трансформатора, масса стали сердечника $M_{\text{ст}}$ — третьей степени этих размеров. Поэтому в геометрически подобных трансформаторах, имеющих одинаковые электромагнитные нагрузки (т. е. при $q_M = \text{const}$), при уменьшении номинальной мощности отношение $I_0 / I_{\text{ном}}$ увеличивается. *Применение повышенной частоты способствует значительному уменьшению намагничивающего тока и приближает условия работы трансформаторов малой мощности при холостом ходе к условиям работы силовых трансформаторов средней мощности.*

Схема замещения и внешние характеристики. В трансформаторах малой мощности, работающих при частоте 50 Гц, потоки рассеяния относительно малы, и индуктивными сопротивлениями обмоток X_1 и X'_2 в некоторых случаях можно пренебречь. При этом схема замещения (рис. 2.37, а) содержит только активные сопротивления обмоток R_1 и R'_2 .

Зависимость напряжения $u_{\text{к.а.}}$ от номинальной мощности имеет вид

$$u_{\text{к.а.}} = I_{\text{ном}} R_K / U_{1\text{ном}} = I_{\text{ном}}^2 R_K / (U_{1\text{ном}} I_{\text{ном}}) = \Delta P_{\text{эл}} / S_{\text{ном}} .$$

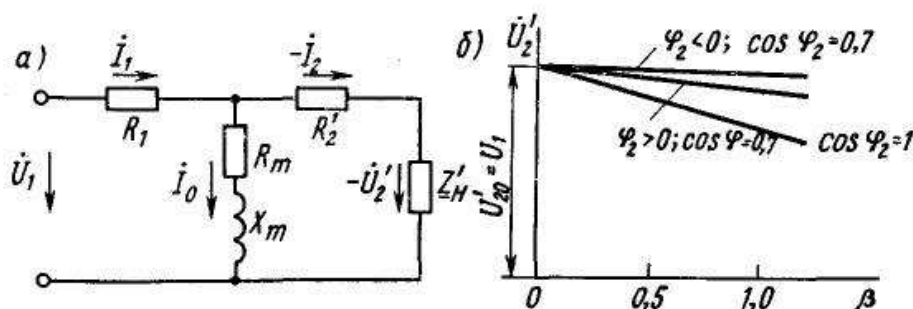


Рис. 2.37 - Схема замещения и внешние характеристики трансформаторов малой мощности

В геометрически подобных трансформаторах при уменьшении номинальной мощности $S_{\text{ном}}$ электрические потери в обмотках $\Delta P_{\text{эл}}$ уменьшаются медленнее, чем мощность $S_{\text{ном}}$, поэтому падение напряжения $u_{\text{к.а}}$ в трансформаторах малой мощности значительно больше, чем в мощных трансформаторах. Соответственно меньше и отношение $I_{\text{к}}/I_{\text{ном}}$.

При увеличении частоты f номинальная мощность $S_{\text{ном}}$, которую может дать трансформатор заданных габаритных размеров, возрастает и отношение $\Delta P_{\text{эл}}/S_{\text{ном}}$ уменьшается, вследствие чего уменьшается и величина $u_{\text{к.а}}$. Поэтому увеличение частоты приближает условия работы трансформаторов малой мощности (соотношение между $u_{\text{к.а}}$ и $u_{\text{к.р}}$) к условиям работы мощных трансформаторов.

В трансформаторах малой мощности $u_{\text{к.а}} \gg u_{\text{к.р}}$, а следовательно, и *активная нагрузка вызывает большее изменение напряжения, чем реактивная*. При активно-индуктивной нагрузке чем меньше $\cos \varphi_2$, тем выше располагаются внешние характеристики. При активно-емкостной нагрузке они располагаются выше, чем при активной (рис. 2.37,6) и активно-индуктивной.

2.11 Коэффициент полезного действия трансформатора

Энергетическая диаграмма. При работе в трансформаторе возникают потери энергии. *Коэффициентом полезного действия трансформатора* (КПД) равен отношению отдаваемой мощности P_2 к мощности P_1 , поступающей в первичную обмотку:

$$\eta = P_2 / P_1 = (U_2 I_2 \cos \varphi_2) / (U_1 I_1 \cos \varphi_1)$$

или

$$\eta = (P_1 - \Delta P) / P_1 = 1 - \Delta P / (P_2 + \Delta P), \quad (2.49)$$

где ΔP — суммарные потери в трансформаторе.

Высокие значения КПД трансформаторов не позволяют определять его с достаточной степенью точности путем непосредственного измерения мощностей P_1 и P_2 , поэтому его вычисляют *косвенным методом* по значению потерь мощности.

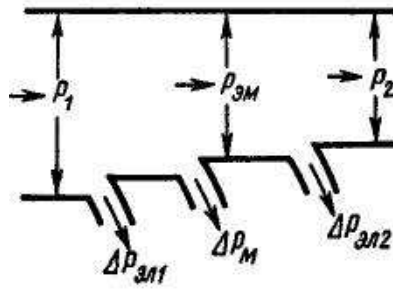


Рис. 2.38 - Энергетическая диаграмма трансформатора

Процесс преобразования энергии в трансформаторе характеризует энергетическая диаграмма (рис. 2.38). При передаче энергии из первичной обмотки во вторичную возникают электрические потери мощности в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток $\Delta P_{эл1}$ и $\Delta P_{эл2}$, а также магнитные потери в стали магнитопровода ΔP_m (от вихревых токов и гистерезиса). Поэтому

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{эл2} - \Delta P_m \quad (2.50)$$

и формулу (2.49) можно представить в виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_m} = 1 - \frac{\Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_m}{P_2 + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_m} . \quad (2.51)$$

Величину $P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_m$, поступающую во вторичную обмотку, называют *внутренней электромагнитной мощностью трансформатора*. Она определяет габаритные размеры и массу трансформатора.

Определение потерь мощности. Согласно требованиям ГОСТа потери мощности в трансформаторе определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. Получаемый при этом результат имеет высокую точность, так как при указанных опытах трансформатор не отдает мощность нагрузке. Следовательно, вся мощность, поступающая в первичную обмотку, расходуется на компенсацию имеющихся в нем потерь.

При опыте холостого хода ток I_0 невелик и электрическими потерями мощности в первичной обмотке можно пренебречь. В то же время магнитный поток практически равен потоку при нагрузке, так как его величина определяется приложенным к трансформатору напряжением. Магнитные потери в ста-

ли пропорциональны квадрату значения магнитного потока. Следовательно, с достаточной точностью можно считать, что *магнитные потери в стали магнитопровода равны мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении*, т. е.

$$\Delta P_m \approx P_0. \quad (2.52)$$

Для определения суммарных электрических потерь согласно упрощенной схеме замещения (см. рис. 2.33, а) полагают, что $I'_2 = I_1$. При этом

$$\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2 \approx I_2'^2 (R_1 + R_2') \approx I_2'^2 R_K \quad (2.53)$$

или

$$\Delta P_{эл} \approx \beta^2 I_{2ном}^2 R_K \approx \beta^2 \Delta P_{эл.ном}, \quad (2.54)$$

где $\Delta P_{эл.ном}$ — суммарные электрические потери при номинальной нагрузке.

За расчетную температуру обмоток — условную температуру, к которой должны быть отнесены потери мощности $\Delta P_{эл}$ и напряжение u_K , принимают: для масляных и сухих трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В (см. 12.1) температуру 75 °С; для трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости F, H — температуру 115 °С.

Величину $\Delta P_{эл.ном} \approx I_{2ном}^2 R_K \approx I_{1ном}^2 R_K$ можно с достаточной степенью точности принять равной мощности P_K , потребляемой трансформатором при опыте короткого замыкания, который проводится при номинальном токе нагрузки. При этом магнитные потери в стали ΔP_m весьма малы по сравнению с потерями $\Delta P_{эл}$ из-за сильного уменьшения напряжения U_1 а следовательно, и магнитного потока трансформатора и ими можно пренебречь. Таким образом

$$\Delta P_{эл} = \beta^2 P_K. \quad (2.55)$$

Полные потери

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K \quad (2.56)$$

Подставляя полученные значения P в (2.51) и учитывая, что $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx \beta S_{ном} \cos \varphi_2$, находим:

$$\eta = 1 - (\beta^2 P_K + P_0) / (\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0) \quad (2.57)$$

Эта формула рекомендуется ГОСТом для определения КПД трансформатора. Значения P_0 и P_K для силовых трансформаторов приведены в соответствующих стандартах и каталогах.

Зависимость КПД от нагрузки. По (2.57) можно построить зависимость КПД от нагрузки (рис. 2.39, а). При $\beta = 0$ полезная мощность и КПД равны нулю. С увеличением отдаваемой мощности КПД увеличивается, так как в энергетическом балансе уменьшается удельное значение магнитных потерь в стали, имеющих постоянное значение. При некотором значении $\beta_{опт}$ кривая КПД достигает максимума, после чего начинает уменьшаться с увеличением нагрузки. Причиной этого является сильное увеличение электрических потерь в обмотках, возрастающих пропорционально квадрату тока, т. е. пропорционально β^2 , в то время как полезная мощность P_2 возрастает только пропорционально β .

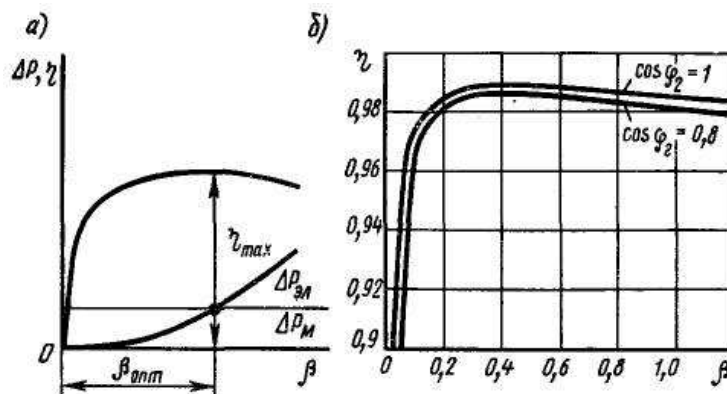


Рис. 2.39 - Зависимость КПД трансформаторов η от нагрузки β

Максимальное значение **КПД** в трансформаторах большой мощности достигает весьма высоких пределов (0,98-0,99). Оптимальный коэффициент нагрузки $\beta_{опт}$, при котором КПД имеет максимальное значение, можно определить, взяв первую производную $d\eta/d\beta$ по формуле (2.57) и приравняв ее нулю. При этом

$$\beta_{опт}^2 P_K = P_0 \quad \text{или} \quad \Delta P_{эл} = \Delta P_{м} . \quad (2.58)$$

Следовательно, *КПД имеет максимум при такой нагрузке, при которой электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали.* Это

условие (равенство постоянных и переменных потерь) приближенно справедливо и для других типов электрических машин. Для серийных силовых трансформаторов

$$\beta_{opt} = \sqrt{P_0 / P_K} \approx \sqrt{0,2 \div 0,25} \approx 0,45 \div 0,5 . \quad (2.59)$$

Указанные значения β_{opt} получены при проектировании трансформаторов на минимум приведенных затрат (на их приобретение и эксплуатацию). Наиболее вероятная нагрузка трансформатора соответствует $\beta = 0,5 - 0,7$.

В трансформаторах максимум КПД выражен сравнительно слабо, т. е. он сохраняет высокое значение в довольно широком диапазоне изменения нагрузки ($0,4 < \beta < 1,5$). При уменьшении $\cos \varphi_2$ КПД снижается (рис. 2.39, б), так как возрастают токи I_2 и I_1 при которых трансформатор имеет заданную мощность P_2 .

В трансформаторах малой мощности в связи с относительным увеличением потерь *КПД существенно меньше, чем в трансформаторах большой мощности*. Его значение составляет 0,6—0,8 для трансформаторов, мощность которых менее 50 Вт; при мощности 100-500 Вт КПД равен 0,90-0,92.

2.12 Преобразование трехфазного тока

Преобразование трехфазного тока можно осуществлять с помощью группы из трех однофазных трансформаторов или посредством одного трехстержневого трехфазного трансформатора. Обычно используют трехстержневые трансформаторы. Только при очень больших мощностях (более 10 МВ·А в фазе) в ряде случаев применяют группы из трех однофазных трансформаторов, которые имеют существенные преимущества при транспортировке и монтаже (мощные высоковольтные трехфазные трансформаторы нетранспортабельны).

Трехфазная группа. На рис. 2.40 показано включение трех однофазных трансформаторов в трехфазную сеть. Первичные обмотки трансформаторов включены звездой и, следовательно, обмотка каждого трансформатора вклю-

чена на фазное напряжение.

Если имеется нулевой провод, то работа трансформатора в трехфазной группе ничем не отличается от рассмотренной выше работы однофазного трансформатора. Поэтому в данном случае можно пользоваться векторной диаграммой и всеми уравнениями однофазного трансформатора.

При симметричной нагрузке необходимость в нулевом проводе отпадает; в этом случае также можно рассматривать работу только одной фазы, т. е. однофазный трансформатор.

Трехстержневой трехфазный трансформатор. Для объяснения принципа действия трехстержневого трехфазного трансформатора представим его в виде трех однофазных трансформаторов (рис. 2.41, а), у которых катушки размещены на стержнях 1, 2 и 3, а ярма 4, 5 и 6 конструктивно объединены в одно общее ярмо. Через это ярмо проходит суммарный поток $\Phi_{рез} = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$.

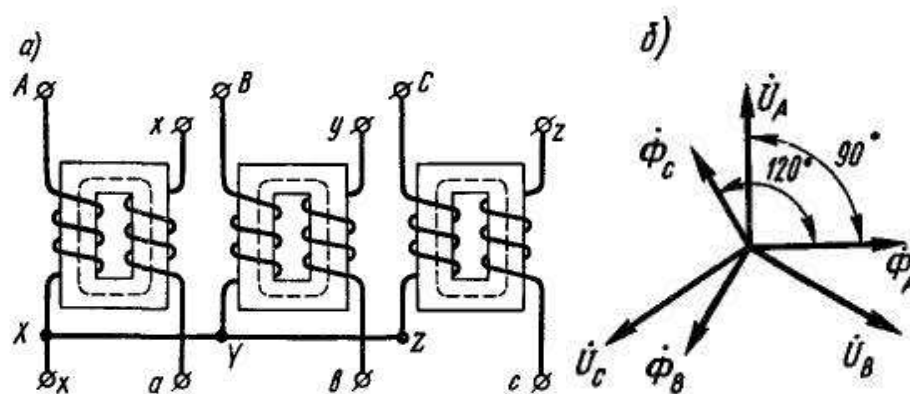


Рис. 2.40 - Принципиальная схема трансформаторной группы из трех однофазных трансформаторов (а) и векторная диаграмма (б) потоков и напряжений в отдельных фазах

Однако если на первичные обмотки этих трансформаторов подать систему симметричных трехфазных напряжений (рис. 2.41, б), то сумма Φ_A , Φ_B , и Φ_C в любой момент времени будет равна нулю. Следовательно, трехфазный трансформатор можно выполнить без объединенного ярма для замыкания потоков отдельных фаз. Полученный таким образом симметричный трехстержневой трансформатор (рис. 2.41, б) можно сделать более компактным, несколько уменьшив длину магнитной цепи, по которой замыкается поток Φ_C ,

исключив из нее два ярма (рис. 2.41, в).

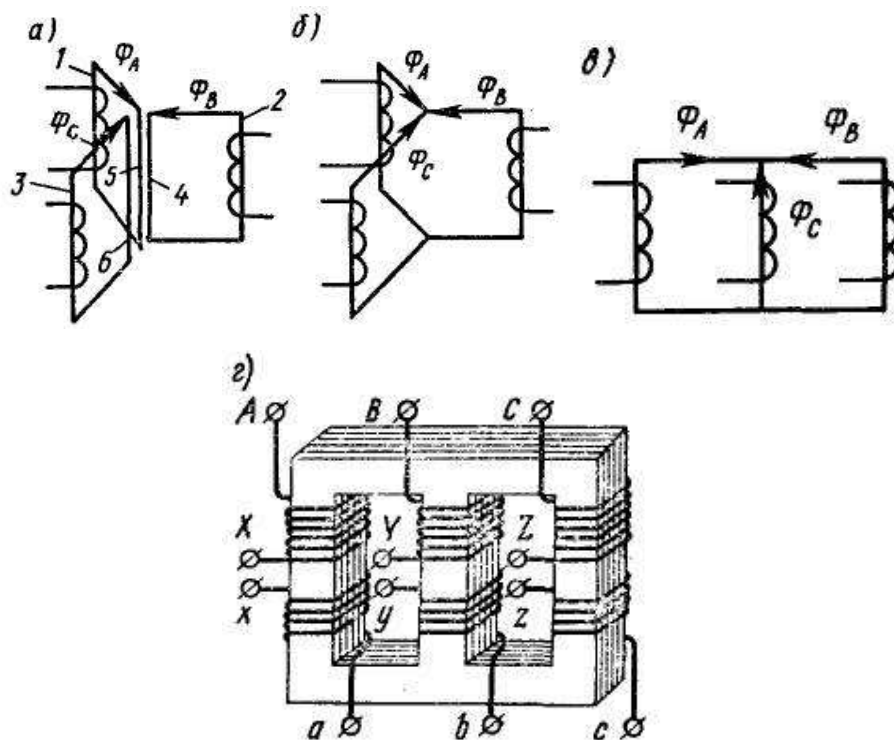


Рис. 2.41 - Схемы, характеризующие образование трехстержневого трансформатора из трех однофазных

Возникшая при этом небольшая магнитная несимметрия контуров, по которым проходят потоки отдельных фаз, вызывает несимметрию токов холостого хода этих фаз. Однако, как показано выше, при нагрузке ток холостого хода оказывает весьма малое влияние на токи в первичной и вторичной обмотках. В результате получаем трехстержневой трансформатор (рис. 2.41, д), в котором первичная и вторичная обмотки каждой фазы расположены на общем стержне. При симметричном питающем напряжении и равномерной нагрузке (являющейся наиболее распространенной) все фазы трехфазного трансформатора находятся практически в одинаковых условиях. Поэтому выведенные выше формулы и схемы замещения для однофазного трансформатора справедливы и для трехфазного трансформатора. Однако в режиме холостого хода, на который большое влияние оказывает схема соединения обмоток, имеются особенности.

Схемы соединения обмоток. Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам “звезда”, “звезда с вы-

веденной нулевой точкой”, “треугольники” или “зигзаг с выведенной нулевой точкой”. Обычно обмотку высшего напряжения соединяют по схеме “звезда”, что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе. Согласно ГОСТу схему соединения “звезда” обозначают знаком Y , русской буквой $У$ или латинской Y ; схему “треугольник” — знаком D , русской буквой $Д$ или греческой D ; схему “зигзаг” — латинской буквой Z . Если нулевая точка обмотки выведена из трансформатора, то у буквенного обозначения ставят индекс n . Начала и концы обмотки ВН обозначают A, B, C и X, Y, Z ; для обмотки НН — a, b, c и x, y, z ; вывод нулевой точки — O (для ВН) и o (для НН). Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$y / y_n - 0$
				$y / \Delta - 11$
				$y_n / \Delta - 11$
				$y / Z_n - 11$
				$\Delta / y_n - 11$

Трехфазные трансформаторы характеризуются двумя коэффициентами трансформации:

а) фазным - равным отношению числа витков $w_{ВН}$ фазы обмотки ВН к числу витков $w_{НН}$ фазы обмотки НН или же отношению фазных напряжений этих обмоток в режиме холостого хода:

$$k_{\phi} = w_{ВН} / w_{НН} = U_{оф.ВН} / U_{оф.НН} ; \quad (2.60)$$

б) линейным — равным отношению линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

$$k_L = U_{ол.ВН} / U_{ол.НН} . \quad (2.60a)$$

Для схем У/У и Д/Д коэффициенты трансформации равны: $k_L = k_\phi$; для схемы У/Д линейный коэффициент $k_L = \sqrt{3}k_\phi$, а для схемы Д/У — $k_L = k_\phi / \sqrt{3}$.

При соединении обмотки трансформатора по схеме Z_H (рис. 2.42, а) каждая фаза состоит из двух одинаковых катушек, которые размещены на разных стержнях и соединены между собой встречно так, чтобы векторы индуцируемых в них ЭДС вычитались (рис. 2.42, б).

Схема Z_H неэкономична, так как при одном и том же фазном напряжении U_ϕ она требует большего расхода обмоточного провода, чем при схемах У и Д. Это объясняется тем, что в рассматриваемой схеме фазное напряжение U_ϕ в $\sqrt{3}$ раз больше напряжения U_K на каждой катушке, а при размещении двух катушек на одном стержне и их последовательном соединении $U_\phi = 2U_K$. Поэтому обычно схему Z_H не применяют; ее используют только в трансформаторах для вентильных преобразователей (см. 2.23).

Особенности режима холостого хода. В 2.6 показано, что в однофазном трансформаторе из-за насыщения магнитной цепи ток холостого хода при синусоидальном магнитном потоке оказывается несинусоидальным, т. е. возникает ряд высших гармонических:

$$i_0 \approx I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots$$

В трехфазном трансформаторе выражения для тока холостого хода в фазах имеют вид:

$$i_{0A} = I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots ;$$

$$i_{0B} = I_{01m} \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_{03m} \sin 3(\omega t - 2\pi/3) + \dots ;$$

$$i_{0C} = I_{01m} \sin(\omega t - 4\pi/3) + I_{03m} \sin 3(\omega t - 4\pi/3) + \dots$$

Заметим, что третьи гармонические токов во всех фазах совпадают по времени: $i_{03A} = i_{03B} = i_{03C} = I_{03m} \sin 3\omega t$. При некоторых схемах включения об-

моток это оказывает влияние на форму кривой магнитного потока трансформатора, а следовательно, и на форму кривой ЭДС.

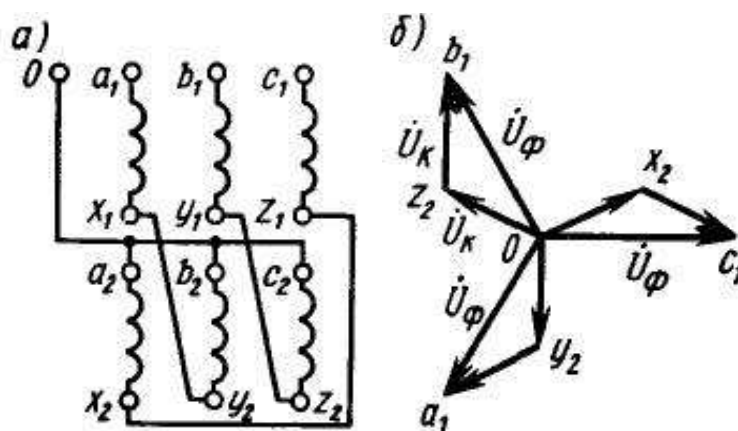


Рис. 2.42 - Схема “зигзаг” и ее векторная диаграмма

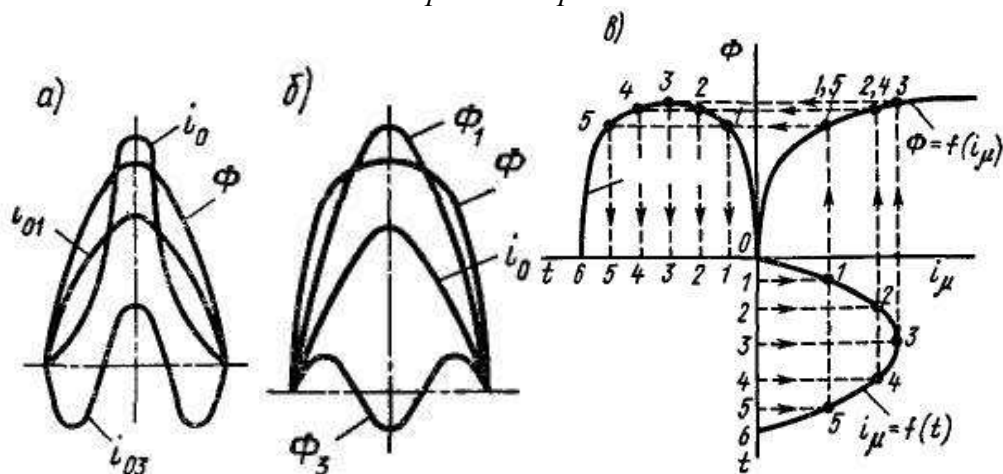


Рис. 2.43 - Кривые потока Φ и тока холостого хода i_0 при соединении обмоток трехфазного трансформатора по схемам Y_n/Y и Y/Y

При соединении обмоток трансформатора по схеме Y_n/Y третьи гармонические фазных токов замыкаются по нулевому проводу. При этом ток холостого хода i_0 в каждой фазе содержит третью гармоническую i_{03} , а поток Φ является синусоидальным, как в однофазном трансформаторе (рис. 2.43, а).

При соединении обмоток по схеме Y/Y путь для замыкания третьих гармонических фазных токов отсутствует и ток холостого хода оказывается синусоидальным. В результате этого кривая магнитного потока Φ искажается (рис. 2.43, б) и приобретает плоскую форму; при этом поток содержит третью гармоническую Φ_3 . Несинусоидальными являются и ЭДС, индуцированные в фазах,— они имеют заостренную форму. Построение кривой изменения магнит-

ного потока Φ при синусоидальном изменении тока i_m выполняется так же (рис. 2.43, *в*), как и построение кривой $i_m = f(t)$ (см. рис. 2.28, *б*), но в обратном порядке. Следует, однако, отметить, что в трехстержневом трансформаторе возникающие третьи гармонические потоков фаз Φ_{A3} , Φ_{B3} , Φ_{C3} не могут замыкаться по стальному магнито-проводу, так как они аналогично третьим гармоническим токам совпадают по времени и, следовательно, в любой момент времени направлены по контуру магнитопровода встречно (рис. 2.44, *а*). Поэтому эти гармонические выходят из стержней и замыкаются от ярма к ярму через воздух, т. е. по пути, имеющему большое магнитное сопротивление. Вследствие чего третьи гармонические потоков малы и потоки фаз Φ_A , Φ_B и Φ_C в трехстержневом трансформаторе мало отличаются от синусоидальных.

Обычно амплитуды потоков фаз отличаются на 5—10% от амплитуд их первых гармонических, что вызывает соответствующее небольшое искажение формы кривой фазных ЭДС. Еще одним отрицательным последствием возникновения третьих гармонических потоков фаз является увеличение потерь мощности.

Эти потоки в трехстержневом трансформаторе замыкаются главным образом по стенкам бака, стяжным болтам и другим металлическим конструктивным деталям, окружающим магнитопровод (рис. 2.44, *б*). При этом в них индуцируются вихревые токи, создающие дополнительные потери мощности и местный нагрев соответствующих деталей. Отметим, что дополнительные потери достигают значительной величины только в трансформаторах мощностью свыше 1000 кВ·А. В трансформаторах меньшей мощности их практически можно не учитывать.

В группах, состоящих из трех однофазных трансформаторов, третьи гармонические потоков фаз могут замыкаться по тому же пути, что и основная гармоническая, и вследствие этого достигать недопустимой величины. Поэтому для таких групп схему U/U не применяют.

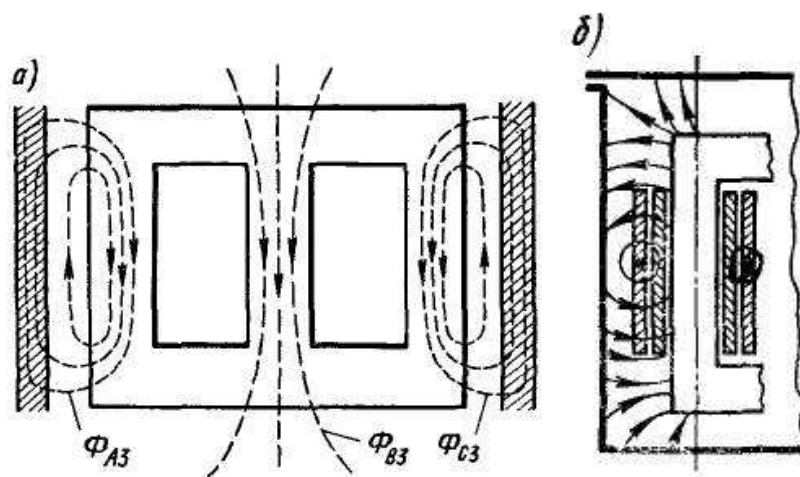


Рис. 2.44 - Пути прохождения третьих гармонических потоков стержней в трех-
фазном трансформаторе

Если одна из обмоток трансформатора соединена треугольником, то фазные потоки трансформатора становятся практически синусоидальными. Это объясняется тем, что в обмотке, соединенной треугольником, совпадающие по времени третьи гармонические ЭДС вызывают ток тройной частоты I_{23} , который циркулирует по фазным обмоткам (рис. 2.45, а) и уменьшает третьи гармонические потоки. Упрощенно можно считать, что результирующий поток тройной частоты является суммой третьих гармонических потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками $\Phi_{рез3} = \Phi_{13} + \Phi_{23}$.

Как показывает векторная диаграмма (рис. 2.45, б), результирующий поток $\Phi_{рез3}$ незначителен, так как для токов тройной частоты обмотка, соединенная треугольником, является короткозамкнутой и даже небольшая ЭДС \dot{E}_{23} вызывает значительный ток i_{23} .

Таким образом, обмотки трехстержневых трансформаторов лучше всего соединять по схемам Y/Δ и Y_n/Δ , которые позволяют практически устранять третьи гармонические в кривых потока и в ЭДС. Силовые трансформаторы средней мощности при вторичных напряжениях не более 400 В можно соединять и по схемам Y/Y и Δ/Y , так как это позволяет получать от вторичной обмотки не только линейное напряжение 380 В, используемое в силовых цепях, но и фазное напряжение 220 В, требуемое для осветительных установок.

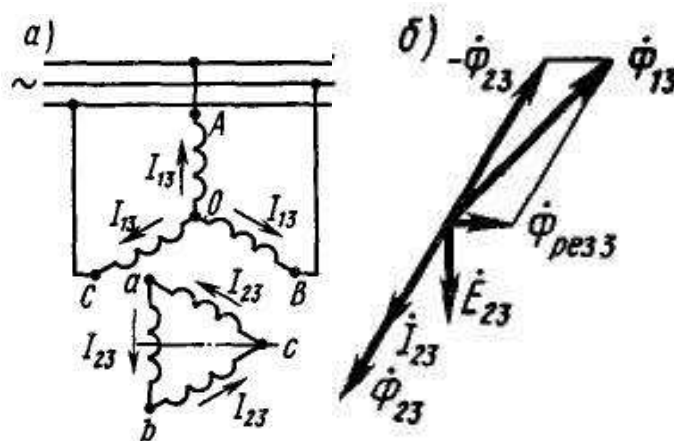


Рис. 2.45 - Схема прохождения третьих гармонических тока по фазам трансформатора (а) и векторная диаграмма (б) созданных ими потоков и ЭДС.

2.13 Группы соединений обмоток

Трансформаторы делят на группы в зависимости от сдвига по фазе между линейными напряжениями, измеренными на одноименных зажимах. В однофазном трансформаторе напряжения первичной и вторичной обмоток могут совпадать по фазе или быть сдвинутыми на 180° . Это зависит от направления намотки обмоток и обозначения выводов, т. е. от маркировки. Если обмотки трансформатора намотаны в одну сторону и имеют симметричную маркировку выводов (рис. 2.46, а), то индуцированные в них ЭДС имеют одинаковое направление. Следовательно, совпадают по фазе и напряжения холостого хода⁶. При изменении маркировки выводов одной из фаз или направления намотки одной фазы (рис. 2.46, б) получается сдвиг по фазе между векторами первичного и вторичного напряжения, равный 180° .

Группы соединений обозначают целыми числами от 0 до 11. Номер группы определяют величиной угла, на который вектор линейного напряжения обмотки НН отстает от вектора линейного напряжения обмотки ВН. Для определения номера группы этот угол следует разделить на 30° .

Для однофазных трансформаторов возможны только две группы соединений: нулевая (рис. 2.46, а) и шестая (рис. 2.46, б). Однако отечественная

⁶ Для внешней нагрузки (потребителя) ЭДС и напряжения имеют одинаковую фазу.

промышленность выпускает однофазные трансформаторы только нулевой группы, у которых напряжения первичной и вторичной обмоток совпадают по фазе (см. табл. 2.4).

Таблица 2.4

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				I/I-0

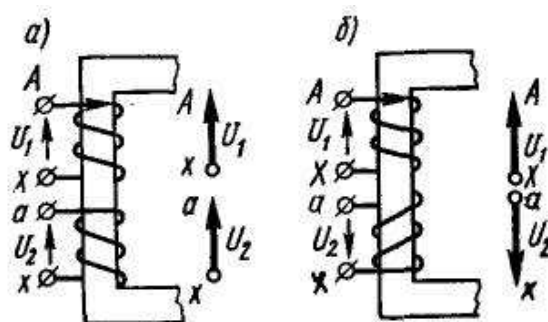


Рис. 2.46 - Группы соединений обмоток однофазного трансформатора

В трехфазных трансформаторах фазные ЭДС двух обмоток, расположенных на одном и том же стержне, могут, так же как и в однофазных трансформаторах, либо совпадать, либо быть противоположными по фазе. Однако в зависимости от схемы соединения обмоток (У или Δ) и порядка соединения их начал и концов получаются различные углы сдвига фаз между линейными напряжениями. Для примера на рис. 2.47 показаны схемы соединения обмоток У/У и соответствующие векторные диаграммы для нулевой (а) и шестой (б) групп; на рис. 2.48 показаны схемы соединения обмоток У/ Δ и соответствующие векторные диаграммы для одиннадцатой (а) и пятой (б) групп.

Изменяя маркировку выводов обмоток, можно получить и другие группы соединений: при схеме У/У — четные: вторую, четвертую и т. д.; при схеме У/ Δ — нечетные: первую, третью и др. Согласно ГОСТу отечественная промышленность выпускает трехфазные силовые трансформаторы только двух

групп: нулевой и одиннадцатой (см. табл. 2.3). Это облегчает практическое включение трансформаторов на параллельную работу.

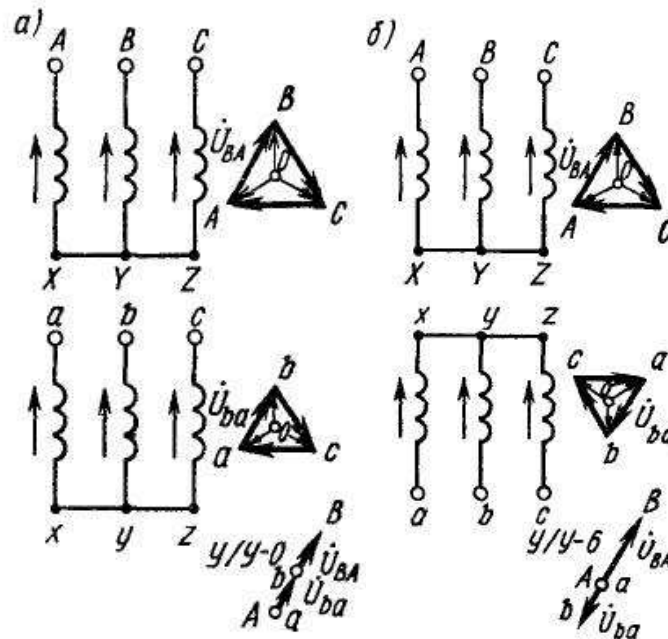


Рис. 2.47 - Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Y

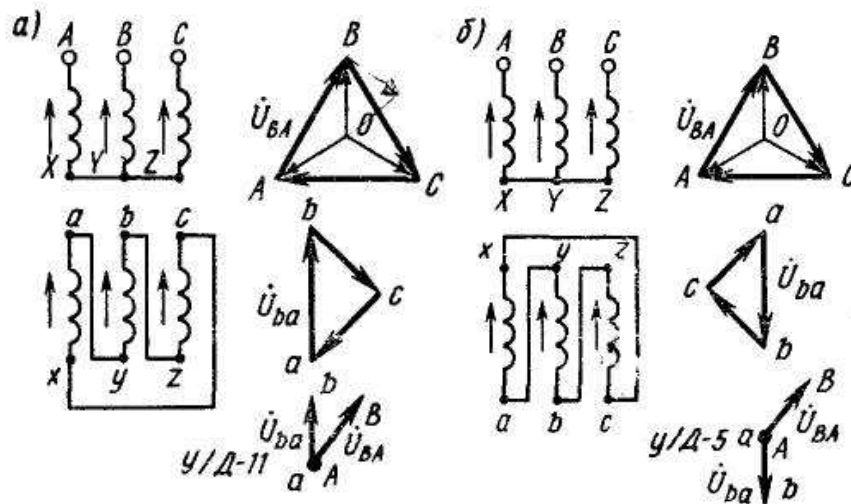


Рис. 2.48 - Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Δ

При соединении обмотки НН по схеме Z_{H} , а обмотки ВН по схеме Y (рис. 2.49) фазные напряжения обмотки НН сдвинуты относительно соответствующих фазных напряжений обмотки ВН (например, U_{a10} относительно U_{A0}) на угол 330° , т. е. при таком соединении имеем одиннадцатую группу. Это объясняется тем, что между векторами линейных напряжений (не показанных на рис. 2.49) имеется такой же угол.

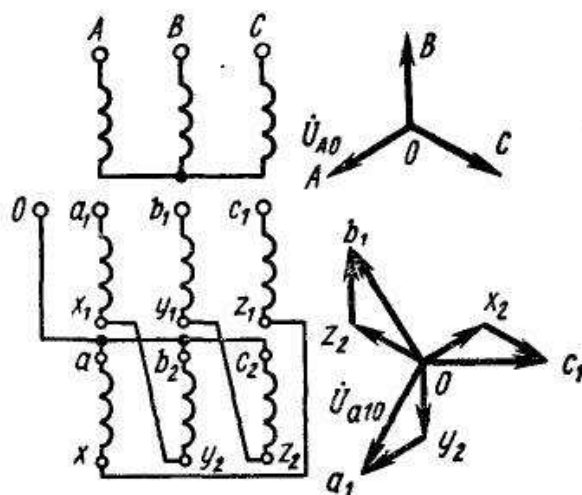


Рис. 2.49 - Группа соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Z_т

2.14 Параллельная работа трансформаторов

Условия включения на параллельную работу. В большинстве случаев при значительной мощности электрической установки целесообразно иметь не один, а несколько трансформаторов меньшей мощности, включенных параллельно на общую нагрузку. Такое дробление общей трансформаторной мощности позволяет лучше решать проблему энергоснабжения потребителей, отключать часть трансформаторов при уменьшении нагрузки, проще проводить профилактический ремонт трансформаторов и пр.

Для включения трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$ на параллельную работу (рис. 2.50, а) необходимо, чтобы при холостом ходе в их обмотках не возникали уравнительные токи и чтобы нагрузка распределялась между обоими трансформаторами в соответствии с их номинальной мощностью. Для этого требуется соблюдать ряд условий.

При неравенстве ЭДС E_{20I} и E_{20II} параллельно работающих трансформаторов (их вторичных напряжений при холостом ходе — рис. 2.51) возникает уравнительный ток.

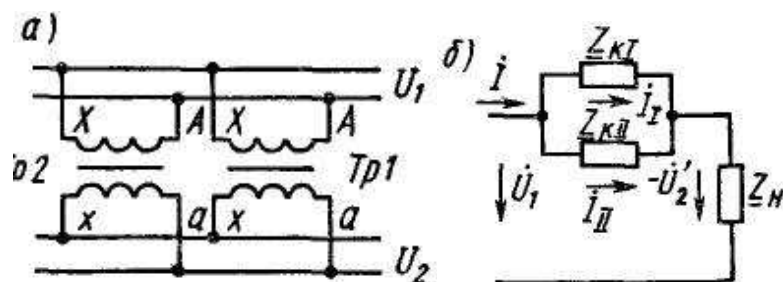


Рис. 2.50 - Схема включения трансформаторов при параллельной работе (а) и схема замещения их (б)

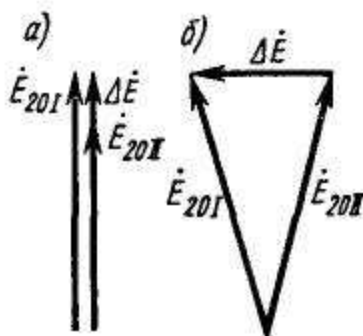


Рис. 2.51 - Векторные диаграммы напряжений при параллельной работе трансформаторов: а — одной группы с различными k ; б — разных групп с одинаковыми k

Этот ток вызывает циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому, а следовательно, неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь и нагрева. Уравнительный ток

$$\dot{I}_{ур} = (\dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}) / (Z_{KI} + Z_{KII}) . \quad (2.61)$$

Из формулы (2.61) следует, что первым необходимым условием для включения трансформаторов на параллельную работу является равенство их вторичных ЭДС, т. е. вторичных напряжений холостого хода (предполагается, что первичные напряжения у них одинаковы, т. е. что трансформаторы подключены к одной и той же первичной сети). При этом трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации. На практике допускается параллельная работа силовых трансформаторов, имеющих различие в коэффициентах трансформации не более 0,5 %, а для трансформаторов с $k > 3$ — не более 1 %. При таком различии в коэффициентах трансформации разность вторичных ЭДС $\Delta \dot{E}$ (рис. 2.51, а) небольшая и уравнительный ток незначительный.

Вторым необходимым условием является совпадение по фазе ЭДС \dot{E}_{20I} и \dot{E}_{20II} , с тем чтобы их векторная разность $\Delta\dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}$ равнялась нулю. Для этого *параллельно работающие трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединений*. При невыполнении этого условия между одноименными зажимами вторичных обмоток возникает разность ЭДС $\Delta\dot{E}$ (рис. 2.51, б), вызывающая появление уравнивающего тока. Так, например, если трансформаторы принадлежат даже к ближайшим группам (например, одиннадцатой и нулевой), сдвиг по фазе между их вторичными ЭДС составляет 30° , и в контуре параллельно соединенных вторичных обмоток возникает большая разность ЭДС

$$\Delta\dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II} = 2E_{20} \sin 15^\circ \approx 0,52E_{20}.$$

При этом уравнивающий ток в несколько раз больше номинального.

Распределение нагрузок. Из условия, полученного для упрощенной схемы замещения трансформаторов (см. рис. 2.50, б):

$$\dot{I}_I Z_{KI} = \dot{I}_{II} Z_{KII} = \dot{I}_{III} Z_{KIII} = \dots = \dot{I}_n Z_{Kn}, \quad (2.62)$$

можно найти распределение нагрузок между параллельно включенными трансформаторами.

Пренебрегая различием в фазе токов, которая зависит от соотношения активных и реактивных сопротивлений короткого замыкания (различие обычно невелико), и заменяя комплексные величины их модулями, получаем

$$I_I : I_{II} : I_{III} = (1/Z_{KI}) : (1/Z_{KII}) : (1/Z_{KIII}), \quad (2.63)$$

т. е. токи распределяются между трансформаторами обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания. Уравнение (2.63) можно привести к виду:

$$I_I : I_{II} : I_{III} = \frac{I_{номI}}{I_{номI} Z_{KI}} : \frac{I_{номII}}{I_{номII} Z_{KII}} : \frac{I_{номIII}}{I_{номIII} Z_{KIII}}. \quad (2.64)$$

Умножаем левую часть (2.64) на $U_2 \cos \varphi_2$, а правую - на $U_{ном}^2/100$:

$$P_I : P_{II} : P_{III} = \frac{S_{номI}}{u_{KI}} : \frac{S_{номII}}{u_{KII}} : \frac{S_{номIII}}{u_{KIII}}. \quad (2.65)$$

Следовательно, для того чтобы нагрузки распределялись между парал-

тельно включенными трансформаторами прямо пропорционально их номинальным мощностям, они должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания. Практически удовлетворительное распределение нагрузки получается в тех случаях, когда напряжения короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов отклоняются от их среднеарифметического значения не более чем на $\pm 10\%$.

Если при параллельной работе напряжения u_k не равны, то перегружается трансформатор с меньшим значением u_k , т. е. с меньшим сопротивлением Z_k . В этом случае придется уменьшить общую нагрузку всей группы параллельно работающих трансформаторов, т. е. установленная мощность трансформаторов недоиспользуется.

При неравенстве активных $u_{k,a}$ и реактивных $u_{k,p}$ составляющих напряжений короткого замыкания токи параллельно работающих трансформаторов сдвинуты по фазе на некоторый угол. При этом суммарный ток, отдаваемый нагрузке, равен векторной сумме токов всех трансформаторов, т. е. меньше их алгебраической суммы. Следовательно, и в этом случае номинальная мощность трансформаторов используется не полностью.

У трансформаторов различных мощностей составляющие $u_{k,a}$ и $u_{k,p}$ различны: у трансформаторов большей мощности $u_{k,p}$ больше, а $u_{k,a}$ меньше, чем у трансформаторов меньшей мощности. Поэтому не рекомендуется включение на параллельную работу трансформаторов с отношением номинальных мощностей больше трех.

2.15 Автотрансформатор

Принципиальная схема. Автотрансформатором называют такой трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения электрически (гальванически) связана с обмоткой высшего напряжения.

В схеме понижающего автотрансформатора (рис. 2.52, а) первичное напряжение подводится к зажимам A и X ; вторичной обмоткой служит часть первичной обмотки между зажимами a и x , причем зажимы X и x совмещены.

Так как в каждом витке обмотки индуцируется одинаковая ЭДС $E = 4,44f\Phi_m$, то при холостом ходе напряжение на зажимах ax

$$U_2 = 4,44fw_{ax}\Phi_m = U_1w_{ax}/w_{AX} = U_1/k. \quad (2.66)$$

где w_{ax} и w_{AX} - числа витков, включенных соответственно между зажимами a и x , A и X ; k - коэффициент трансформации.

Габаритные размеры, масса, потери мощности. В автотрансформаторе различают проходную мощность $S_{пр}$, которая передается из первичной цепи во вторичную и далее нагрузке, и расчетную или типовую мощность $S_{расч}$, передаваемую во вторичную цепь электромагнитным полем. Мощность $S_{расч}$ определяет габаритные размеры и массу автотрансформатора. Если пренебречь потерями, то проходная мощность $S_{пр} = E_1I_1 = E_2I_2$, а расчетная $S_{расч} = E_2I_{ax}$, где I_{ax} - результирующий ток на участке ax обмотки, к которому подключена нагрузка.

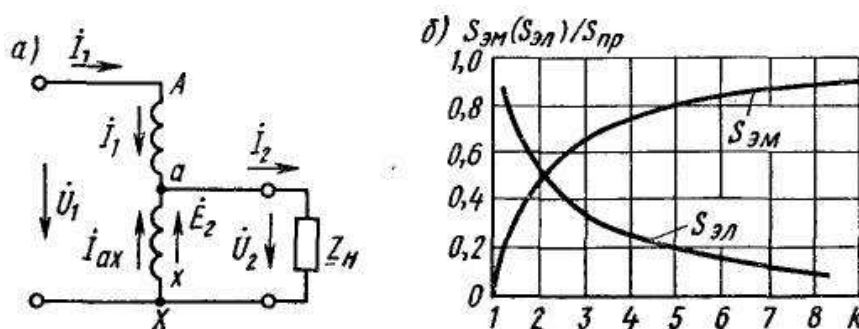


Рис. 2.52 - Схема включения понижающего автотрансформатора и зависимости мощностей $S_{эм}$ и $S_{эл}$ от коэффициента трансформации

На участке ax через обмотку проходит ток, равный векторной сумме токов вторичной и первичной цепей $\mathcal{E}_{ax} = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_1$. Однако, как следует из векторной диаграммы (см. рис. 2.27), токи \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_1 сдвинуты по фазе приблизительно на угол 180° . Поэтому, пренебрегая током холостого хода и переходя к модулям токов \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_1 , получаем

$$I_{ax} = I_2 - I_1. \quad (2.67)$$

Следовательно, проходная мощность

$$S_{пр} = E_2I_2 = E_2(I_{ax} + I_1) = E_2I_{ax} + E_2I_1 = S_{эм} + S_{эл}. \quad (2.68)$$

При этом $S_{эм} = E_2 I_{ax} = S_{расч}$ — мощность, передаваемая во вторичную цепь электромагнитным полем, которая является расчетной мощностью автотрансформатора; $S_{эл} = E_2 I_1$ — мощность, передаваемая в эту цепь вследствие электрической (гальванической) связи между первичной и вторичной цепями.

При указанных выше условиях, принимая $I_1 = I'_2 = I_2/k$, получаем из (2.67)

$$I_{ax} = I_2(1 - 1/k). \quad (2.69)$$

Откуда расчетная мощность автотрансформатора

$$S_{расч} = E_2 I_{ax} = E_2 I_2(1 - 1/k). \quad (2.70)$$

Отношение

$$k_{выг} = S_{расч} / S_{пр} = 1 - 1/k. \quad (2.71)$$

называют *коэффициентом выгодности*

Мощность, передаваемая во вторичную цепь электрическим путем,

$$S_{эл} = E_2 I_1 = E_2 I'_2 = (E_2 I_2) / k = S_{пр} / k. \quad (2.72)$$

В двухобмоточном трансформаторе $S_{эл} = 0$ и $S_{расч} = S_{пр}$.

Таким образом, расчетная мощность автотрансформатора меньше, чем мощность двухобмоточного трансформатора при той же проходной мощности, передаваемой из первичной цепи во вторичную, что позволяет выполнить автотрансформатор с меньшей массой и меньшими габаритными размерами. Отношение этих мощностей определяет коэффициент выгодности.

На рис. 2.52, б показаны зависимости мощностей $S_{эм}$ и $S_{эл}$ в долях от проходной мощности $S_{пр}$ от коэффициента трансформации k . Очевидно, чем ближе значение коэффициента трансформации k к единице, тем меньше расчетная мощность автотрансформатора и тем выгоднее его применять с точки зрения уменьшения массы, габаритных размеров и потерь мощности. Например, при $k = 1,1$ расчетная мощность автотрансформатора уменьшается в 10 раз, а при $k = 10$ получается почти такой же, как у двухобмоточного трансформатора.

Электрические потери в обмотках автотрансформатора по той же причине могут быть существенно меньшими, чем в обмотках двухобмоточного трансформатора. При номинальном режиме в двухобмоточном трансформаторе электрические потери рассчитывают как:

$$\Delta P_{эл.тр} = I_{1ном}^2 R_1 + I_{2ном}^2 R_2 \approx I_{1ном}^2 R_k = P_{к.тр} . \quad (2.73)$$

В автотрансформаторе суммарные потери на участках Aa и ax

$$\Delta P_{эл.атр} = \Delta P_{эл.Aa} + \Delta P_{эл.ax} \quad (2.74)$$

или

$$\Delta P_{эл.атр} = I_{Aa}^2 R_{Aa} + I_{ax}^2 R_{ax} . \quad (2.75)$$

В автотрансформаторе $I_{Aa} = I_1$ поэтому сечения проводов в первичной обмотке двухобмоточного трансформатора и на участке Aa автотрансформатора одинаковы, а сопротивление $R_{Aa} < R_1$:

$$R_{Aa} = R_1 (w_{Aa} / w_{Ax}) = R_1 (w_1 - w_2) / w_1 = R_1 (1 - 1/k) . \quad (2.76)$$

На участке ax автотрансформатора проходит ток $I_{ax} = I_2 (1 - 1/k)$, поэтому сечение провода на этом участке можно выбрать меньшим, чем во вторичной обмотке двухобмоточного трансформатора — пропорционально отношению токов, проходящих по участку ax и вторичной обмотке:

$$R_{ax} / R_2 = I_2 / I_{ax} \approx I_2 / [I_2 (1 - 1/k)] \approx 1 / (1 - 1/k) . \quad (2.77)$$

Таким образом, из формул (2.76) и (2.77) следует, что

$$\begin{aligned} P_{эл.атр} &= I_1^2 R_1 (1 - 1/k) + I_2^2 (1 - 1/k)^2 R_2 / (1 - 1/k) \approx \\ &\approx (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2) (1 - 1/k) . \end{aligned} \quad (2.78)$$

Следовательно, отношение электрических потерь в автотрансформаторе и двухобмоточном трансформаторе

$$\Delta P_{эл.атр} / \Delta P_{эл.тр} \approx 1 - 1/k . \quad (2.79)$$

Формула (2.79) показывает, что *потери мощности в автотрансформаторе меньше, чем в двухобмоточном трансформаторе.*

Активные и индуктивные (обусловленные потоками рассеяния) сопротивления автотрансформатора также меньше, чем соответствующие сопротив-

ления двухобмоточного трансформатора:

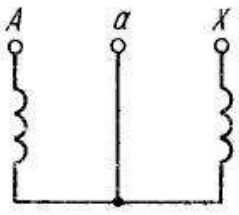


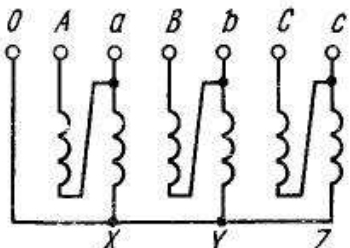
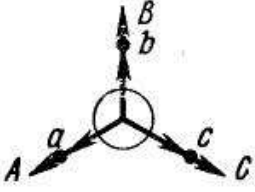
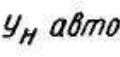
$$R_{к.авт} = R_{к.тр} (1 - 1/k) ; \quad X_{к.авт} = X_{к.тр} (1 - 1/k) . \quad (2.80)$$

Поэтому ток короткого замыкания у автотрансформатора, подключенного к сети со стороны обмотки ВН, больше чем у двухобмоточного трансформатора.

Конструктивно обмотки Aa и ax выполняют обычно в виде двух concentric катушек. Такое исполнение предотвращает появление больших потоков рассеяния.

Области применения. В технике применяют автотрансформаторы одно- и трехфазные при необходимости сравнительно небольшого изменения напряжения: при $k \leq 2,5$ ч 3. При больших k выгода от их применения уменьшается. Силовые автотрансформаторы служат для снижения напряжения при пуске мощных асинхронных и синхронных электродвигателей. Автотрансформаторы малой мощности широко используют в устройствах связи и автоматики, радиоаппаратуре и лабораторных стендах. В последнее время автотрансформаторы большой мощности применяют для соединения высоковольтных сетей различных напряжений (110, 154, 220, 330, 500, 750 кВ).

Таблица 2.5

Схема соединения обмоток	Диаграмма векторов ЭДС	Условное обозначение
ВН и НН	ВН и НН	
		
		

Существенным недостатком автотрансформаторов является то, что вторичная цепь у них электрически соединена с первичной. Поэтому обмотка НН и подключенные к ней потребители должны иметь ту же изоляцию относительно земли, что и обмотка ВН и первичная цепь. Поэтому для обеспечения электробезопасности не допускается применять автотрансформаторы для питания цепей низкого напряжения от сети высокого напряжения.

Автотрансформаторы большой мощности редко применяют при $k > 2$ во избежание возникновения опасных перенапряжений во вторичной цепи при появлении атмосферных и коммутационных перенапряжений в первичной цепи (в линиях электропередачи).

Схемы и группы соединения обмоток одно- и трехфазных автотрансформаторов приведены в табл. 2.5.

2.16 Многообмоточные трансформаторы

В энергетических устройствах довольно широко применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиотехники и автоматики - многообмоточные трансформаторы малой мощности. Наиболее распространенная схема многообмоточного трансформатора — одна первичная и несколько вторичных обмоток.

На рис. 2.53 схематически показано устройство трехобмоточного трансформатора, в котором первичная обмотка 1 расположена между двумя вторичными обмотками 2 и 3. Такие трансформаторы применяют на электрических станциях и подстанциях для питания сетей с различными номинальными напряжениями. Очевидно, что в данном случае двум вторичным напряжениям U_2 и U_3 , получаемым, например, от обмоток СН и НН, соответствуют два коэффициента трансформации:

$$k_{12} = w_{в.н} / w_{с.н} ; k_{13} = w_{в.н} / w_{н.н} . \quad (2.81)$$

Установившиеся процессы в обмотках трансформатора описываются уравнениями:

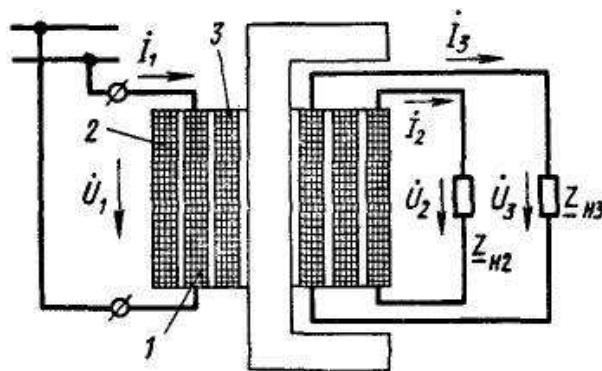


Рис. 2.53 - Расположение обмоток в силовом трехобмоточном трансформаторе: 1 — первичная обмотка; 2, 3 — вторичные обмотки

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2; \\ \dot{U}_3 &= \dot{E}_3 - \dot{I}_3 R_3 - j\dot{I}_3 X_3; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2 w_2 / w_1 - \dot{I}_3 w_3 / w_1. \end{aligned} \right\} \quad (2.82)$$

Если привести параметры обмоток 2 и 3 к первичной 1 (так же, как это делается для двухобмоточного трансформатора), то системе уравнений (2.82) будет соответствовать схема замещения, изображенная на рис. 2.54, а. От схемы замещения двухобмоточного трансформатора она отличается тем, что вторичная цепь имеет два луча. Очевидно, что *при изменении нагрузки в одной из вторичных обмоток изменяются напряжения на обеих вторичных обмотках, т. е. имеется взаимное влияние вторичных обмоток*. Это объясняется тем, что изменяется падение напряжения на сопротивлении \underline{Z}_1 схемы замещения, по которой проходит суммарный ток I_1 . Векторная диаграмма для трехобмоточного трансформатора изображена на рис. 2.54, б.

Параметры схемы замещения можно определить расчетным либо экспериментальным путем. Параметры намагничивающего контура находятся посредством опытов холостого хода так же, как и для двухобмоточного трансформатора. Следует провести три опыта короткого замыкания: а) при замкнутой накоротко обмотке 2 и разомкнутой обмотке 3; б) при замкнутой накоротко обмотке 3 и разомкнутой обмотке 2; в) при замкнутых накоротко обмотках 2 и 3.

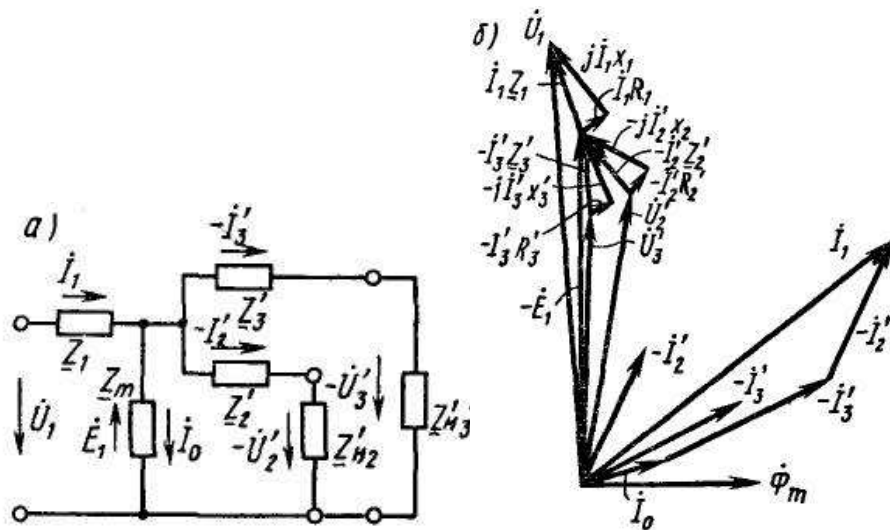


Рис. 2.54 - Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) силового трехобмоточного трансформатора

Напряжения короткого замыкания определяются при токах, соответствующих номинальной мощности наиболее мощной (первичной) обмотки. В соответствии с указанными опытами имеем

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2; \underline{Z}_{13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3; \\ \underline{Z}_K &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2 \underline{Z}'_3 / (\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3). \end{aligned} \right\} \quad (2.83)$$

Решаем систему уравнений (2.83):

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_{12} - \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_{12} - (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13})a / (a - 1); \\ \underline{Z}'_2 &= (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13})a / (a - 1); \underline{Z}'_3 = (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) / (a - 1), \end{aligned} \right\} \quad (2.84)$$

где $a^2 = (\underline{Z}_K - \underline{Z}_{12}) / (\underline{Z}_K - \underline{Z}_{13})$.

Следует отметить, что полученные параметры схемы замещения справедливы только при указанном на рис. 2.53 расположении обмоток: первичная обмотка расположена между двумя крайними вторичными. При изменении расположения обмоток изменяются параметры схемы замещения, так как изменяются потоки рассеяния этих обмоток. Например, если в качестве первичной используется одна из крайних обмоток, а вторичной — другая крайняя обмотка, то их индуктивные сопротивления резко возрастают, так как возрастают соответствующие потоки рассеяния.

Согласно ГОСТу силовые *трехобмоточные трансформаторы* *выполняют на одну номинальную мощность для всех трех обмоток*. Раньше изготавливали трехобмоточные трансформаторы, у которых одна из вторичных обмоток имела номинальную мощность, равную $\frac{2}{3}$ от мощностей двух других обмоток, или обе вторичные обмотки имели номинальную мощность, равную $\frac{2}{3}$ мощности первичной обмотки. То обстоятельство, что сумма мощностей вторичных обмоток во всех случаях больше мощности первичной обмотки, на практике не приводит к перегрузке первичной обмотки, так как редко имеет место совпадение максимумов нагрузок обеих обмоток по времени. Кроме того, коэффициенты мощности $\cos \varphi_2$ и $\cos \varphi_3$ обычно различны, вследствие чего токи \mathcal{E}'_2 и \mathcal{E}'_3 сдвинуты по фазе и поэтому $I_1 < \mathcal{E}'_2 + \mathcal{E}'_3$. Схемы и группы соединения силовых трехфазных трехобмоточных трансформаторов, выполненные в соответствии с ГОСТом, приведены в табл. 2.6, а одно- и трехфазных трехобмоточных автотрансформаторов — в табл. 2.7.

Таблица 2.6

Схема соединения обмоток			Диаграмма векторов ЭДС			Условное обозначение
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						$y_H / y_H / \Delta - 0 - 11$
						$y_H / \Delta / \Delta - 11 - 11$

Силовые трансформаторы малой мощности (для телевизоров, радиоприемников и т. п.) выполняют, как правило, многообмоточными: они имеют одну первичную обмотку и несколько вторичных, от которых питаются различные

электрические цепи, не связанные между собой (например, цепи накала радиоламп напряжением 6,3 В, их анодные цепи напряжением 200 — 300 В и т. п.). Типичная схема силового трансформатора радиоприемника приведена на рис. 2.55, а.

Таблица 2.7

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				УН авто/Д-0-11
				авто/—0-0

Первичная обмотка разбита на две части и имеет несколько выводов для включения трансформатора на различные напряжения сети (выводы A и $X1$ — для напряжения 127 В, A и $X2$ — для напряжения 220 В). Ко вторичным обмоткам подключают различные потребители с сопротивлениями $Z_{н1}$, $Z_{н2}$, ..., $Z_{нп}$.

Схема замещения многообмоточного трансформатора отличается от двухобмоточного тем, что она имеет несколько лучей во вторичной цепи (рис. 2.55, б) в соответствии с числом вторичных обмоток. В маломощных низковольтных трансформаторах ($U_{ном} < 220$ В; $S_{ном} < 500$ В·А) изоляция между обмотками имеет малую толщину, вследствие чего потоки рассеяния трансформаторов относительно малы. Поэтому в схеме замещения индуктивными сопротивлениями можно пренебречь и учитывать только активные сопротивления обмоток.

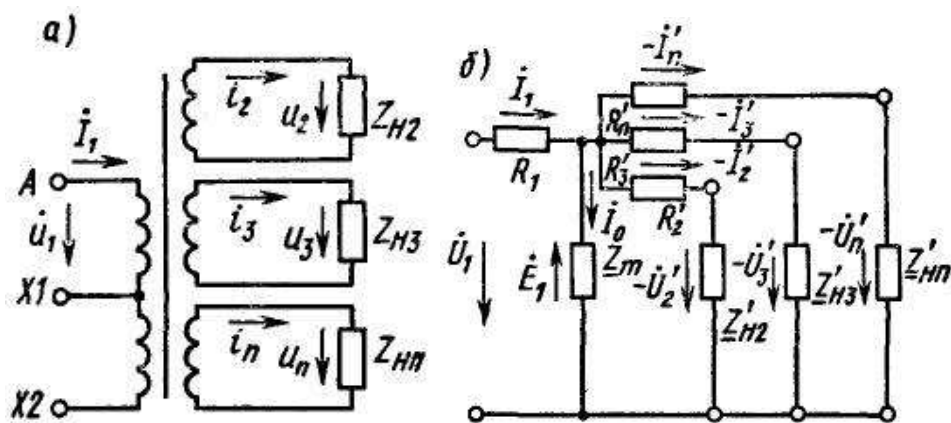


Рис. 2.55 - Электрическая схема и схема замещения многообмоточного трансформатора

Активные сопротивления обмоток в таких трансформаторах измеряют обычными методами (при постоянном токе), а затем приводят к числу витков первичной обмотки, умножая на квадрат соответствующего коэффициента трансформации. Проведение опытов короткого замыкания между парами обмоток для многообмоточного трансформатора нецелесообразно из-за большого различия в мощностях первичной и вторичной обмоток, а следовательно, невозможности установить номинальные значения тока одновременно для первичной и вторичной обмоток.

2.17 Регулирование напряжения в трансформаторах

Принципы регулирования. При эксплуатации трансформаторов довольно часто возникает необходимость регулирования вторичного напряжения. При этом различают два основных случая:

1) стабилизация вторичного напряжения при незначительном (на 5 - 10 %) изменении первичного напряжения, что происходит обычно из-за падения напряжения в линии;

2) регулирование вторичного напряжения (из-за особенностей технологического процесса) в широких пределах при неизменном (или мало изменяющемся) первичном напряжении.

В обоих случаях вторичное напряжение регулируется путем изменения коэффициента трансформации, т. е. соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток.

В первом случае при небольших изменениях первичного напряжения можно изменять число витков либо первичной, либо вторичной обмотки. Например, при снижении первичного напряжения соответственно уменьшают число витков первичной обмотки так, чтобы ЭДС витка осталась неизменной. Поскольку число витков вторичной обмотки не изменяется, неизменной остается и ЭДС вторичной обмотки. При возрастании первичного напряжения соответственно увеличивают число витков первичной обмотки.

Во втором случае, когда требуется регулировать вторичное напряжение при неизменном первичном, изменяют число витков вторичной обмотки. Изменять число витков первичной обмотки в этом случае нельзя, так как это приведет к изменению магнитного потока трансформатора и, как следствие, к его перегреву или плохому использованию. Кроме того, очевидно, что получить малое выходное напряжение $U_2 = U_1 w_2 / w_1$ при неизменном числе витков вторичной обмотки практически невозможно, так как при этом необходимо иметь большое число регулировочных витков⁷.

Переключение ответвлений обмоток w_1 и w_2 может осуществляться при отключении трансформатора от первичной и вторичной сетей (переключение без возбуждения) или под нагрузкой (регулирование под нагрузкой). Существуют также трансформаторы с плавным регулированием напряжения, в которых плавно изменяют число витков w_2 или магнитный поток Φ_2 , охватываемый этой обмоткой.

Переключение ответвлений без возбуждения. Регулирование напряжения этим способом применяют в масляных и сухих силовых трансформаторах общепромышленного назначения, а также в трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей. Напряжение регулируют на $\pm 5\%$ от $U_{\text{ном}}$ ступенями по $2,5\%$, т. е. трансформатор имеет пять ступеней регулирования напряжения. В трансформаторах сравнительно небольшой мощности

⁷ При очень больших мощностях иногда применяют регулирование по высоковольтной первичной стороне (чтобы избежать применения регулирующей аппаратуры на большие токи), используя специальные автотрансформаторные схемы.

используют три ступени регулирования напряжения (+ 5; 0; – 5%). В силовых трансформаторах большой мощности обычно напряжение регулируют на стороне ВН. Это позволяет упростить конструкцию переключателя ответвлений, так как токи в обмотке ВН меньше, чем в обмотке

НН. Кроме того, число витков обмотки ВН больше, чем обмотки НН, вследствие чего изменение числа витков на 1,25 – 2,5 % можно осуществлять с большей точностью. В трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей, часто напряжение регулируют на стороне НН; при этом переключающую аппаратуру выполняют на большие токи, что сильно усложняет ее конструкцию.

При регулировании напряжения отключают часть витков только одной (первичной или вторичной) обмотки, что нарушает равномерность распределения МДС по высоте обмотки. Это приводит к искажению магнитного поля рассеяния и возникновению поперечной составляющей потока рассеяния, которая, взаимодействуя с током обмоток, создает электромагнитные силы, действующие на обмотку в осевом направлении (см. 2.19). При аварийных режимах (короткое замыкание) эти силы могут достигать больших значений и вызывать разрушение обмотки. Поэтому стремятся равномерно распределить отключаемые витки обмотки по высоте или расположить их по возможности в середине высоты обмотки симметрично относительно обоих ярм. В трехфазных трансформаторах сравнительно небольшой мощности, где электромагнитные силы при коротких замыканиях невелики, для упрощения конструкции переключателя ответвлений целесообразно выполнять ответвления вблизи заземленной нулевой точки обмотки, так как при этом уменьшается напряжение, на которое должна быть рассчитана изоляция переключателя. Если ответвления располагать в средней части обмотки (в мощных трансформаторах), то переключающую аппаратуру необходимо выполнять с усиленной изоляцией и с высокой степенью точности, так как несогласованность работы ее элементов при высоком напряжении может привести к серьезным авариям.

В трансформаторах с многослойной цилиндрической обмоткой отклю-

чаемые витки обычно размещают в конце обмотки во внешнем ее слое и располагают симметрично по высоте относительно обоих ярм. При переходе с одного ответвления $X_1 - X_5$ на другое (рис. 2.56, а) отключается равное число витков. В обмотках других конструкций ответвления $A_2 - A_7$ располагают в средней части обмотки (рис. 2.56, б). При номинальном напряжении обмотки ВН до 35 кВ часто применяют обратную схему (рис. 2.56, в), которая позволяет расположить ответвления $X_1 - X_5$ около нулевой точки и в то же время в середине обмотки (по высоте). При обратной схеме одна половина обмотки имеет правую, а другая — левую намотку.

В масляных трансформаторах переключение ответвлений осуществляют контактным переключателем, встроенным в трансформатор, рукоятка которого выведена из бака.

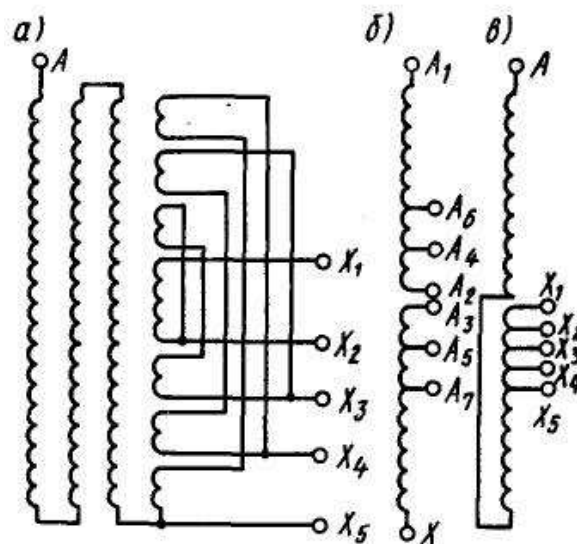


Рис. 2.56 - Расположение регулировочных ответвлений в силовых трансформаторах: а — в многослойных цилиндрических обмотках; б — в средней части обмоток (прямая схема); в — в средней части обмотки (обратная схема)

В сухих трансформаторах ответвления выводят на контактную панель и переключение производят путем перестановки контактной пластины на различные выводные шпильки.

Контактный переключатель (рис. 2.57, а) имеет систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями обмотки, и систему подвижных контактов, замыкающихся с неподвижными и обеспечивающих требуемую схему

соединения между собой обмоток отдельных фаз. При выполнении ответвлений $X_1 - X_5$, $Y_1 - Y_5$ и $Z_1 - Z_5$ у нулевой точки можно применить общий переключатель для всех трех фаз (рис. 2.57, б), так как рабочее напряжение между отдельными частями переключателя не превышает 10% от линейного напряжения трансформатора. Если ответвления $A_1 - A_5$; $B_1 - B_5$; $C_1 - C_5$ расположены в середине обмотки (см. рис. 2.56, б), то каждая фаза должна иметь переключатель (рис. 2.57, в), так как между ответвлениями разных фаз действует напряжение, равное приблизительно $0,5U_{\text{ном}}$.

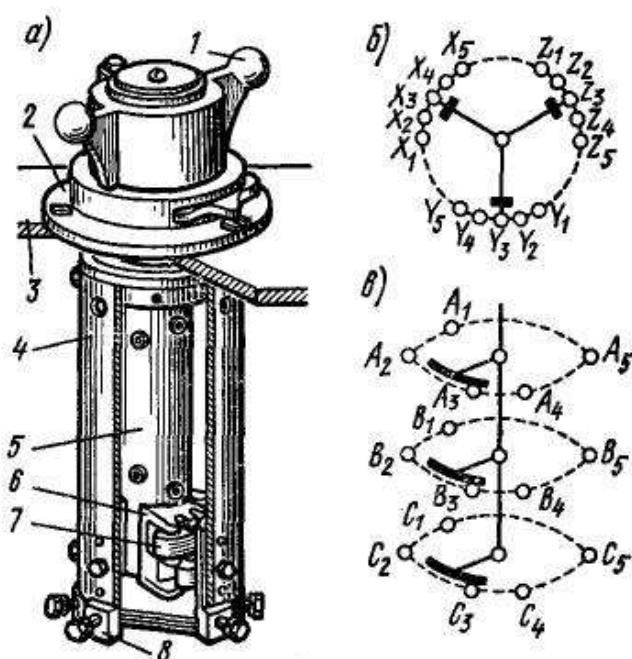


Рис. 2.57 - Трехфазный переключатель ответвлений (а) и схемы расположения его контактных элементов (б, в): 1 — привод, 2 — фланец колпака; 3 — крышка бака трансформатора; 4 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 5 — бумажно-бакелитовая изоляция вала; 6 — коленчатый вал; 7 — подвижные контакты; 8 — неподвижные контакты

Переключение ответвлений под нагрузкой. Для повышения гибкости и удобства управления крупными электрическими сетями и системами большое значение имеет возможность регулирования напряжения трансформаторов без перерыва нагрузки. Потребность в таких трансформаторах быстро возрастает. Поэтому промышленность выпускает трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой для всех мощностей от 63 до 200 000 кВ·А с пределами регулирования $\pm(10 \text{ч} 16)\%$.

При использовании этого способа регулирования необходимо :

1) обеспечить переход с одного ответвления на другое без разрыва тока, для чего в определенный момент времени должны быть включены два соседних ответвления;

2) ограничить ток короткого замыкания (ток короткого замыкания) в части обмотки трансформатора, расположенной между этими ответвлениями при одновременном их включении.

Для этого применяют переключающие устройства с дистанционным управлением и с токоограничивающими реакторами и резисторами, а в трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей, - устройства с вентильным переходом.

На рис. 2.58 приведена схема переключающего устройства с токоограничивающим реактором в трех положениях его переключающих элементов. Устройство состоит из реактора P , двух контакторов $K1$ и $K2$, предназначенных для разрыва тока, проходящего по двум параллельным ветвям реактора, и двух переключателей $П1$ и $П2$, осуществляющих переключения этих ветвей при отсутствии тока.

Переключающее устройство действует следующим образом. В *первом рабочем положении I*, когда переключающее устройство подключено к ответвлению X_1 контакторы $K1$ и $K2$ замкнуты и ток проходит по параллельным ветвям реактора в разных направлениях, не намагничивая его.

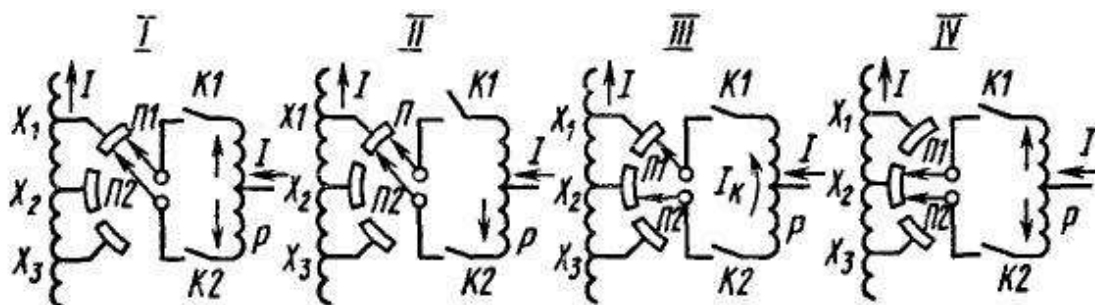


Рис. 2.58 - Схемы переключающего устройства с токоограничивающим реактором

Поэтому индуктивное сопротивление реактора весьма мало. При переходе с ответвления X_1 на ответвление X_2 сначала отключается контактор $K1$, но цепь тока не прерывается, так как он продолжает проходить через контактор $K2$ (промежуточное положение II). Затем переключатель $П2$ без тока перево-

дится на ответвление X_2 , после чего вновь включается контактор $K1$ (*промежуточное положение III*). В этом положении через обе половины реактора проходит ток одного направления, его индуктивное сопротивление резко возрастает и он эффективно ограничивает ток I_k в замкнутом контуре, образованном частью обмотки трансформатора, которая расположена между ответвлениями X_1 и X_2 . После этого размыкается контактор $K2$, переключатель $П1$ переводится без тока на ответвление X_2 и снова замыкается контактор $K2$, т. е. на этом заканчивается переход во *второе рабочее положение IV*, при котором переключающее устройство подключено к ответвлению X_2 .

Реактор и переключатели помещают внутри масляного бака трансформатора, а контакторы — в специальном баке (рис. 2.59), расположенном на боковой стенке основного бака. Находящееся в нем масло, которое загрязняется при разрыве контакторами тока, не соединяется с маслом основного бака.

В переключающем устройстве с токоограничивающими резисторами (рис. 2.60, *а*) имеются три переключателя — $П1$, $П2$ и $П3$. При работе трансформатора на ответвлении X_2 переключатели $П2$ и $П3$ занимают показанное на рисунке 2.60 положение. Чтобы перейти на соседнее ответвление X_1 сначала на это ответвление следует провести без тока переключатель $П1$. Затем быстродействующий переключатель $П3$ быстро перебрасывается по часовой стрелке в положение, при котором он замыкает контакты 1 и 2 . Процесс размыкания контактов $3, 4$ и замыкания контактов $1, 2$ происходит таким образом, что цепь тока не прерывается, а в промежуточном положении, когда переключатель $П3$ замыкает одновременно контакты 1 и 4 , ток в части обмотки трансформатора, расположенной между ответвлениями X_1 и X_2 , ограничивается резисторами R_1 и R_2 . Во избежание перегрева этих резисторов переключатель $П3$ переводится из одного рабочего положения в другое в течение сотых долей секунды.

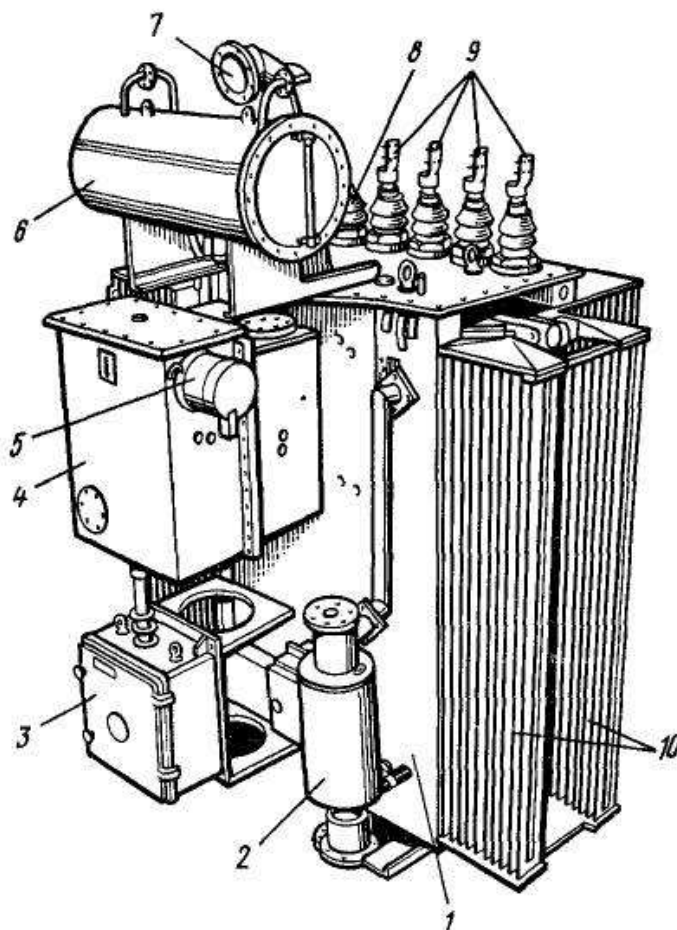


Рис. 2.59 - Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой: 1 - бак; 2 - термосифонный фильтр; 3 — приводной механизм; 4— бак с контакторами; 5 — муфта; 6 — расширитель; 7 — выхлопная труба; 8 — вводы НН; 9 — вводы ВН; 10 — радиаторы

При питании от трансформатора преобразовательных устройств для переключения ответвлений на вторичной обмотке, к которой подключаются вентили преобразователя, широко используют схему вентильного перехода (рис. 2.60, б).

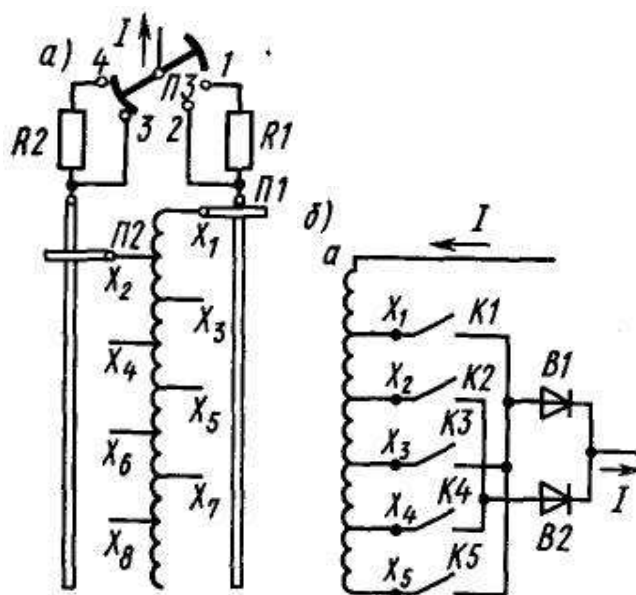


Рис. 2.60 - Схемы переключающего устройства с токоограничивающими активными сопротивлениями (а) и с вентильным переходом (б)

В этой схеме последовательно с нечетными контакторами $K1 - K5$ включен вентиль $B1$, а последовательно с четными контакторами $K2-K4$ – вентиль $B2$. При переходе, например, с ответвления X_1 на X_2 они позволяют осуществлять замыкание контактора $K2$ до отключения $K1$, так как вентили $B1$ и $B2$ предотвращают возникновение тока короткого замыкания в части обмотки между X_1 и X_2 при одновременном включении обоих контакторов. В дальнейшем контактор $K1$ может быть отключен, так как цепь тока будет замкнута через контактор $K2$.

2.18 Трансформаторы с плавным регулированием напряжения

Трансформаторы со скользящими контактами. Для плавного регулирования выходного напряжения трансформатора применяют контактные щетки, скользящие по неизолированной внешней поверхности вторичной обмотки, вследствие чего изменяется число включаемых в работу витков обмотки. Такой метод широко используется в маломощных лабораторных автотрансформаторах — **ЛАТРax**. С повышением мощности трансформаторов и автотрансформаторов применяют двойные комплекты щеток с включенными между ни-

ми резисторами для ограничения тока короткого замыкания при замыкании щетками соседних витков.

Трансформаторы с подвижной вторичной обмоткой. Такие трансформаторы имеют броневого магнитопровод с двумя первичными обмотками и подвижным средним стержнем, на котором размещена вторичная обмотка. При перемещении подвижного стержня плавно изменяется взаимоиндуктивность вторичной обмотки с каждой из первичных обмоток, вследствие чего вторичное напряжение изменяется от $+U_{\max}$ до $-U_{\max}$.

Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов.

Плавное регулирование выходного напряжения трансформатора можно осуществить также путем подмагничивания его магнитопровода постоянным током. Существует большое число конструкций трансформаторов с подмагничиванием. Их основными регулирующими элементами являются подмагничиваемые магнитные шунты, поэтому они называются трансформаторами и автотрансформаторами, регулируемые подмагничиванием шунтов (ТРПШ и АРПШ).

На рис. 2.61, а изображена схема однофазного четырех-стержневого ТРПШ. Магнитная система такого трансформатора состоит из двух главных стержней и двух магнитных шунтов. На главных стержнях размещены первичная и вторичная обмотки, на стержнях магнитных шунтов — обмотка подмагничивания, состоящая из двух катушек. Основной поток Φ замыкается через главные стержни, а поток подмагничивания $\Phi_{\text{пм}}$ — через магнитные шунты. Поток рассеяния Φ_{y1} и Φ_{y2} первичной и вторичной обмоток, сдвинутые по фазе приблизительно на 180° , замыкаются в основном через магнитные шунты. Катушки обмотки подмагничивания соединены последовательно так, что создаваемые ими магнитные потоки складываются, а ЭДС, индуцируемые в них потоками рассеяния Φ_{y1} и Φ_{y2} , взаимно компенсируются.

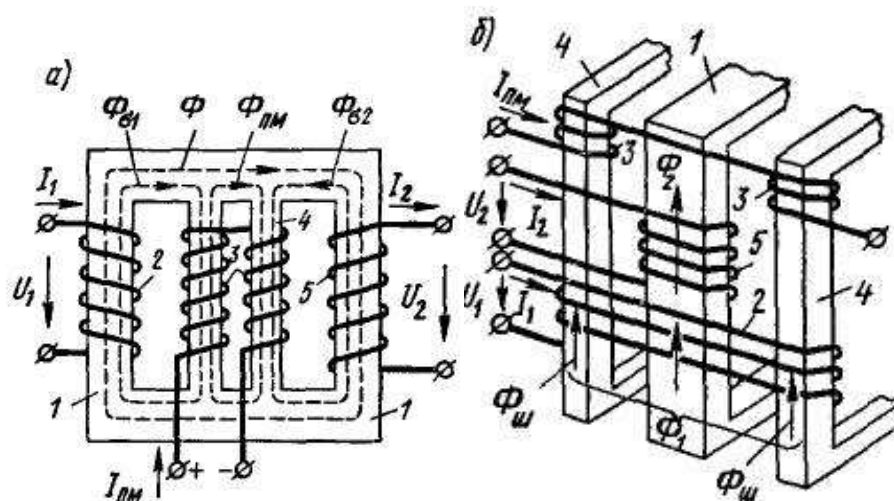


Рис. 2.61 - Электромагнитные схемы однофазных трансформаторов, регулируемых подмагничиванием шунтов: 1 — главные стержни; 2 — первичная обмотка; 3 — обмотка подмагничивания; 4 — магнитные шунты; 5 — вторичная обмотка

Трансформатор работает следующим образом. При отсутствии постоянного тока $I_{пм}$ в обмотке подмагничивания потоки Φ_{y1} и Φ_{y2} имеют максимальную, а основной поток Φ — минимальную величину. При этом вторичное напряжение U_2 минимальное. При прохождении по обмотке подмагничивающего тока магнитные шунты насыщаются и их магнитное сопротивление возрастает. Это приводит к уменьшению потоков Φ_{y1} и Φ_{y2} , увеличению потока Φ и повышению напряжения U_2 . Регулируя подмагничивающий ток, можно плавно изменять вторичное напряжение U_2 .

На рис. 2.61, б показана схема однофазного ТРПШ с составным магнитопроводом. В этом трансформаторе магнитопровод главных стержней и магнитопроводы магнитных шунтов отделены друг от друга изоляционными прокладками. Первичная обмотка охватывает главные стержни и магнитные шунты, а вторичная обмотка — только главные стержни. Обмотка подмагничивания состоит из двух катушек и охватывает магнитные шунты.

При отсутствии постоянного тока в обмотке подмагничивания магнитный поток Φ_1 трансформатора, создаваемый первичной обмоткой, равномерно распределяется между главными стержнями и магнитными шунтами. При этом во вторичной обмотке индуцируется минимальное напряжение U_{min} . При прохождении по обмотке подмагничивания постоянного тока $I_{пм}$ магнитные шун-

ты насыщаются и их магнитное сопротивление возрастает. При этом уменьшаются проходящие по ним магнитные потоки $\Phi_{ш}$, поток Φ_1 вытесняется в главные стержни и проходящий по ним поток Φ_2 увеличивается. Это приводит к возрастанию напряжения U_2 , индуцируемого во вторичной обмотке. Когда магнитные шунты полностью насыщены, магнитный поток Φ_2 в главных стержнях максимальный и с трансформатора снимается максимальное напряжение U_{max} . Таким образом, изменяя ток подмагничивания $I_{пм}$, можно плавно регулировать вторичное напряжение трансформатора.

2.19 Переходные процессы в трансформаторах

Возникновение переходных процессов. При изменении режима работы трансформатора — преднамеренном или случайном — происходит переход от одного установившегося состояния к другому. Обычно этот переходной процесс длится небольшое время (доли секунды), однако он может сопровождаться весьма опасными для трансформатора явлениями. Поэтому при проектировании и эксплуатации трансформаторов нужно учитывать их свойства в переходных режимах. Рассмотрим, как протекают наиболее типичные переходные процессы, имеющие место при коротком замыкании трансформатора и подключении его к сети.

Короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки. Аварийный режим короткого замыкания возникает при повреждении электрической сети, неисправностях аппаратов и других устройств во вторичной цепи, ошибочных действиях обслуживающего персонала и пр.

Большие токи, возникающие в трансформаторе при коротком замыкании, могут вызвать механическое повреждение обмотки (а затем и пробой изоляции) или резкое повышение ее температуры, что угрожает целостности изоляции. Силу тока при коротком замыкании можно найти по упрощенной схеме замещения трансформатора (рис. 2.62, а). Допустим, что напряжение сети не зависит от тока трансформатора, для указанной схемы получим уравнение:

$$L_k di_k / dt + R_k i_k = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) , \quad (2.85)$$

где L_k - результирующая индуктивность обмоток трансформатора при коротком замыкании; $U_{1m}\sin(\omega t + \beta_0)$ — напряжение на зажимах первичной обмотки в момент короткого замыкания.

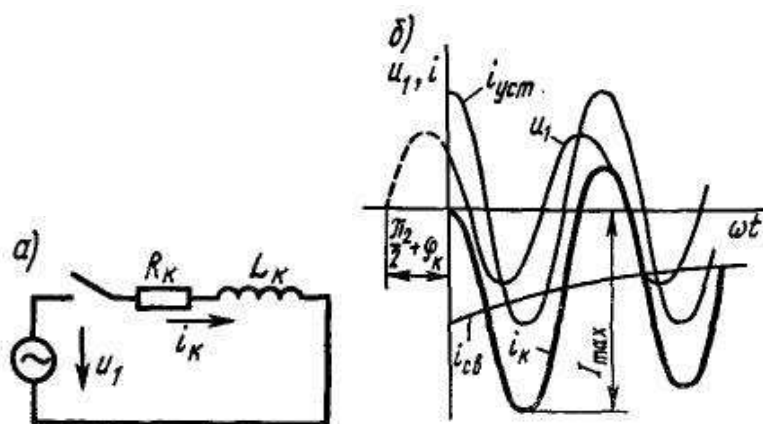


Рис. 2.62 - Схема замещения трансформатора и кривые изменения тока и напряжения при коротком замыкании

Представим ток короткого замыкания i_k , как это принято в электротехнике, в виде суммы двух токов — установившегося тока короткого замыкания $i_{уст}$ и свободного тока $i_{св}$.

Установившийся ток короткого замыкания

$$i_{уст} = (U_{1m} / Z_k) \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_k) = \sqrt{2} I_{к.уст} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_k) , \quad (2.86)$$

где $\varphi_k = \arctg (X_k / R_k)$.

Значение свободного тока $i_{св}$ определим из уравнения:

$$L_k di_{св} / dt + R_k i_{св} = 0 , \text{ откуда}$$

$$i_{св} = C e^{-(R_k / L_k) t} . \quad (2.87)$$

Постоянную интегрирования найдем, положив в момент $t = 0$ ток $i_k = 0$:

$$i_k = i_{уст} + i_{св} = \sqrt{2} I_{к.уст} \sin(\alpha_0 - \varphi_k) + C = 0 ,$$

откуда $C = -\sqrt{2} I_{к.уст} \sin(\alpha_0 - \varphi_k)$. Таким образом, ток короткого замыкания

$$i_k = \sqrt{2} I_{к.уст} [\sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_k) - \sin(\alpha_0 - \varphi_k) e^{-(R_k / L_k) t}] . \quad (2.88)$$

Из уравнения (2.88) следует, что при $\beta_0 = \varphi_k$ свободный ток не возникает, и ток короткого замыкания в начальный момент приобретает установившееся значение. Наибольший свободный ток при $\beta_0 = \pi/2 + \varphi_k$. Этот режим является очень опасным для трансформатора (рис. 2.62, б), так как ток переходного

процесса принимает здесь максимальное значение приблизительно через пол-периода после момента короткого замыкания, т. е. при $\omega t = \pi$.

Подставив в (2.88) значение $b_0 = \pi/2 + \pi/\omega$ и $t = \pi/\omega$, получим

$$I_{k\max} = -\sqrt{2}I_{k,уст}(1 + e^{-(R_k/X_k)\pi}) . \quad (2.89)$$

Величину $I_{k\max}$ называют *ударным током короткого замыкания*. Отношение $k_{уд} = I_{k\max} / (\sqrt{2}I_{k,уст})$ называют *ударным коэффициентом*. В мощных трансформаторах отношение $R_k/X_k \approx (1/10 \text{ ч } 1/15)$, вследствие чего $k_{уд} = 1,7 \text{ ч } 1,8$. В трансформаторах средней мощности $k_{уд} = 1,2 \text{ ч } 1,3$. В трансформаторах малой мощности активное сопротивление больше индуктивного и практически переходным режимом можно пренебречь, так как $e^{-(R_k/X_k)\pi} \approx 0$.

Установившийся ток короткого замыкания при питании трансформатора от источника электрической энергии бесконечно большой мощности с напряжением $U_{1ном}$ можно выразить через номинальный ток трансформатора:

$$I_{k,уст} = (U_{1ном} / Z_k)(I_{ном} / I_{ном}) = I_{ном} U_{1ном} / U_k = 100I_{ном} / u_k . \quad (2.90)$$

При реальных условиях работы трансформаторов, т. е. при питании от источника ограниченной мощности, ток $I_{k,уст}$ вычисляют по формуле, учитывающей реактивное сопротивление сети:

$$I_{k,уст} = 100I_{ном} / \{u_k [1 + 100S_{ном} / (u_k S_k)]\} , \quad (2.91)$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора; S_k — мощность короткого замыкания электрической сети.

В трансформаторах средней и большой мощности напряжение u_k обычно составляет 5 — 15%, поэтому *установившийся ток короткого замыкания в 6 — 20 раз больше номинального тока*. Согласно ГОСТу силовые трансформаторы должны выдерживать без повреждения ток $I_{k,уст} = 25I_{ном}$.

В автотрансформаторах сопротивление короткого замыкания Z_k и напряжение u_k меньше, чем в двухобмоточных трансформаторах той же номинальной мощности, вследствие чего установившийся и ударный токи короткого замыкания в автотрансформаторах обычно больше. Некоторые автотрансформаторы не могут выдерживать без повреждений токи короткого замыка-

ния, и их следует ограничивать до безопасных значений путем включения реакторов.

В трансформаторах и автотрансформаторах малой мощности отношение $I_{к.уст}/I_{ном}$ значительно меньше, чем в мощных трансформаторах.

При коротких замыканиях обмотки трансформаторов сильно нагреваются и на них действуют значительные электромагнитные силы. В трансформаторах при аварийных процессах короткого замыкания температура обмоток ϑ_k не должна превышать значений, указанных в табл. 2.8.

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы длительность короткого замыкания, т. е. время срабатывания защиты было меньше времени t_k , требуемого для достижения опасного нагрева.

При установлении времени t_k принимают, что из-за кратковременности работы трансформатора в режиме короткого замыкания процесс нагревания его обмоток происходит адиабатически, т. е. что выделяемая в них теплота не передается окружающей среде. Кроме того, пренебрегают свободной составляющей тока (она практически затухает через 0,03 — 0,6 с) и оценивают интенсивность нарастания температуры по установившемуся току короткого замыкания. При этих условиях время t_k (с), в течение которого медная обмотка достигает температуры 250 °С,

$$t_k \approx 2,5(u_k / \Delta_k)^2, \quad (2.92)$$

а алюминиевая обмотка достигает температуры 200 °С

$$t_k \approx 0,56(u_k / \Delta_k)^2, \quad (2.93)$$

где Δ_k — плотность тока при коротком замыкании и токе, подсчитанном по формуле (2.91).

Для масляных трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками длительность короткого замыкания не должна превышать 5 с. Обычно при внешних коротких замыканиях современная быстродействующая защита отключает трансформатор от сети значительно раньше, чем температура его обмоток достигает предельных значений.

Таблица 2.8

Тип трансформатора	Максимально допустимая температура на обмотках, °С	
	медных	алюминиевых
Масляные трансформаторы с изоляцией	250	200
Сухие трансформаторы с изоляцией класса нагревостойкости А	180	180
Сухие трансформаторы с изоляцией класса нагревостойкости Е.....	250	200
Сухие трансформаторы с изоляцией классов нагревостойкости В, F, Н	350	200

Однако при внутренних коротких замыканиях в трансформаторе ток в замкнутых накоротко витках возрастает в еще большей степени, чем при коротком замыкании всей обмотки. Это объясняется тем, что при уменьшении числа замкнутых витков ЭДС, действующая в короткозамкнутом контуре, снижается пропорционально числу витков в первой степени, а сопротивление контура (оно определяется индуктивностью замкнутых витков) — пропорционально квадрату числа витков. Поэтому при внутренних коротких замыканиях проводники замкнутых витков частично расплавляются, и в трансформаторе могут возникнуть значительные повреждения.

Электромагнитные силы создаются в трансформаторах в результате взаимодействия тока в обмотке с магнитным полем рассеяния. Реально возникающее поле рассеяния (рис. 2.63, а) можно представить в виде суммы двух полей; продольного с индукцией B_d , магнитные линии которого направлены параллельно оси обмотки, и поперечного с индукцией B_q , линии которого расходятся радиально. Наличие поперечного поля обусловлено краевым эффектом, возникающим вследствие конечных значений высоты и ширины обмотки: чем выше обмотка, тем меньше поперечное поле. При взаимодействии этих полей с током обмотки возникают электромагнитные силы: радиальные F_q ,

стремящиеся сжать внутреннюю обмотку и растянуть внешнюю, и аксиальные F_d , стремящиеся сжать обмотку в продольном направлении.

При отключении в одной из обмоток части витков для регулирования напряжения характер распределения магнитного поля рассеяния изменяется и возникает дополнительное поперечное поле с индукцией B'_q (рис. 2.63, б). В результате появляются дополнительные аксиальные силы F'_d , стремящиеся увеличить имеющуюся несимметрию в расположении витков обмоток. При симметричном расположении отключаемых витков по высоте силы F'_d имеют наименьшее значение. При отключении части витков, расположенных у верхнего или нижнего краев обмотки, они сильно возрастают, вследствие чего возникают силы, которые могут разрушить ярмовую изоляцию трансформатора и обмотки.

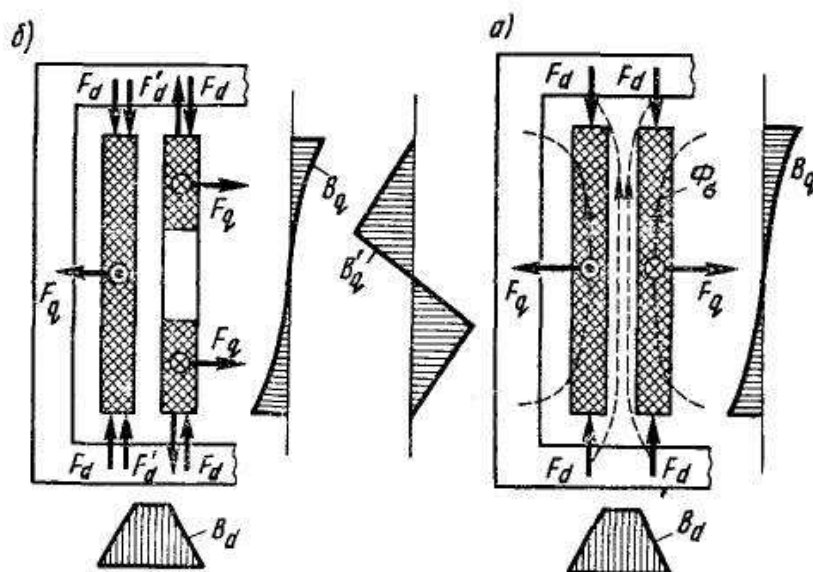


Рис. 2.63 - Электромагнитные силы, действующие на обмотки трансформатора при коротком замыкании

В трансформаторах большой мощности механические усилия, действующие на обмотки, при коротких замыканиях весьма велики и поэтому требуется принимать специальные меры, обеспечивающие механическую прочность обмоток. Поскольку электромагнитные силы пропорциональны квадрату тока, для маломощных трансформаторов опасность механического повреждения обмоток незначительна. Для этих трансформаторов более опасно чрезмерное нагревание обмоток.

Включение ненагруженного трансформатора в сеть. Рассмотрим случай включения однофазного трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке. Исходя из схемы замещения трансформатора при холостом ходе (рис. 2.64, а), можно составить уравнение:

$$L_0 di_0 / dt + R_0 i_0 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) . \quad (2.94)$$

Это уравнение по структуре подобно уравнению (2.85) и отличается от него только коэффициентами L_0 и R_0 (вместо L_k и R_k). Однако пользоваться им нельзя, так как L_0 определяется потоком, замыкающимся по стали, и, следовательно, является переменной величиной.

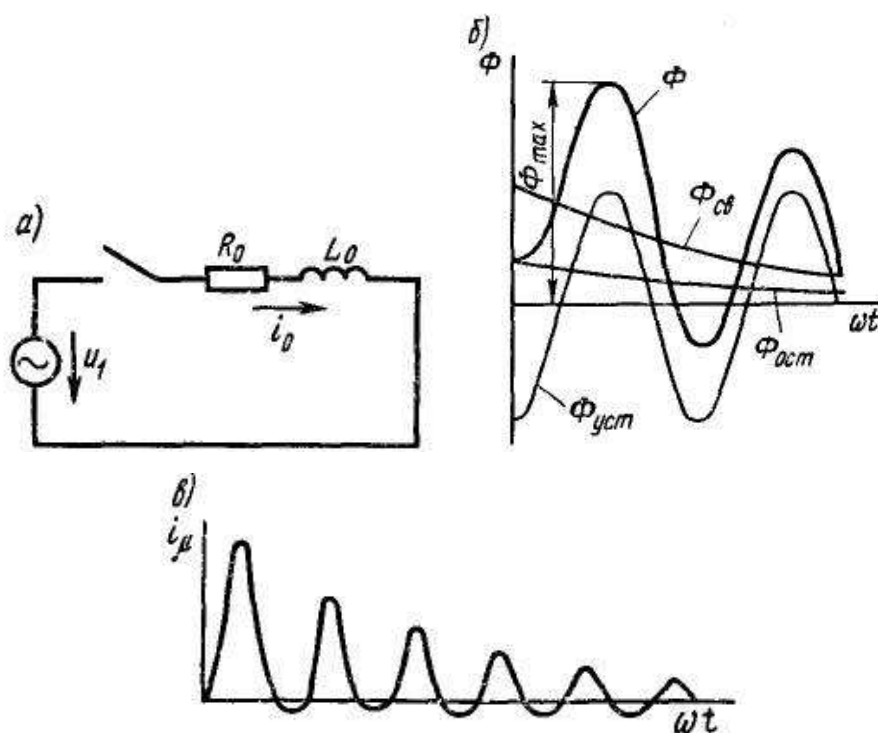


Рис. 2.64 - Схема замещения и кривые изменения потока и намагничивающего тока при включении ненагруженного трансформатора в сеть

В уравнении (2.94) вместо переменной i_0 целесообразно ввести переменную Φ , которую можно определить из уравнения $L_0 i_0 = w_1 \Phi$. При этом получим:

$$w_1 d\Phi / dt + w_1 (R_0 / L_0) \Phi = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) . \quad (2.95)$$

Приближенное решение уравнения (2.95) можно получить, полагая $L_0 \approx \text{const}$; погрешность в данном случае небольшая, так как $R_0 \ll \omega L_0$. По анало-

гии с уравнением (2.85), имеющим ту же структуру, имеем:

$$\Phi = \Phi_{ycm} + \Phi_{св} = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi_0) + C e^{-(R_0/L_0)t} . \quad (2.96)$$

Так как $\omega L_0 \gg R_0$. то $\varphi_0 \approx p/2$ и, следовательно,

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha_0) + C e^{-(R_0/L_0)t} . \quad (2.97)$$

Постоянную интегрирования найдем из начальных условий: при $t = 0$ поток $\Phi = \pm \Phi_{ост}$, где $\Phi_{ост}$ - остаточный магнитный поток, достигающий иногда в трансформаторе значения $0,5\Phi_m$. При этом постоянная интегрирования $C = \Phi_m \cos \alpha_0 \pm \Phi_{ост}$, а выражение (2.97) принимает вид:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha_0) + (\Phi_m \cos \alpha_0 \pm \Phi_{ост}) e^{-(R_0/L_0)t} . \quad (2.98)$$

Наиболее благоприятные условия включения при $\alpha_0 = p/2$ и $\Phi_{ост} = 0$. В этом случае

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (2.99)$$

т. е. с первого же момента в трансформаторе устанавливается номинальный магнитный поток.

Наиболее неблагоприятно включение трансформатора при $\alpha_0 = 0$ и противоположном по знаку потоку $\Phi_{ост}$. Тогда

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + (\Phi_m + \Phi_{ост}) e^{-(R_0/L_0)t} . \quad (2.100)$$

В этом случае через полпериода после включения поток достигает максимума (рис. 2.64, б):

$$\Phi \approx 2\Phi_m + \Phi_{ост} \approx (2 \div 2,5)\Phi_m . \quad (2.101)$$

Двукратной амплитуде потока соответствует намагничивающий ток $I_{мах}$, в десятки и сотни раз (рис. 2.64, в) превышающий амплитуду установившегося тока холостого хода, что объясняется насыщением стали. Это следует учитывать при регулировании защитных устройств, чтобы не получалось ложных срабатываний защиты при включении трансформатора.

2.20 Перенапряжения в трансформаторах

Причины появления перенапряжений. При нормальных условиях работы трансформатора между отдельными частями его обмоток (витками и катушка-

ми), а также между обмотками и заземленным магнитопроводом действуют синусоидальные напряжения номинальной частоты и амплитуды, которые не опасны для правильно спроектированного трансформатора. Если конец обмотки заземлен, то напряжения, действующие между ее витками и заземленным магнитопроводом, изменяются равномерно, уменьшаясь по мере приближения к концу обмотки. При изолированном конце все точки обмотки находятся под одним и тем же напряжением относительно заземленного магнитопровода.

Однако в процессе эксплуатации трансформатор подвергается также воздействию перенапряжений, превышающих номинальное напряжение по амплитуде и имеющих другую частоту и форму кривой. Перенапряжения в трансформаторах вызывают различные причины: коммутационные (включение и выключение трансформатора или соединенных с ним электрических линий), короткие замыкания и грозовые разряды. Наибольшие перенапряжения (до десятикратных значений номинального напряжения) возникают при прямых ударах молнии в провода и опоры электрических линий и при грозовых разрядах вблизи линий, во время которых в проводах индуцируются электромагнитные волны высокого напряжения. Эти перенапряжения называют атмосферными, они наиболее опасны для продольной изоляции (между катушками, слоями и витками обмотки). Перенапряжения, возникающие вследствие коммутационных причин, воздействуют в основном на главную изоляцию обмоток.

В большинстве случаев грозовые разряды создают в линии перенапряжения в виде кратковременных импульсов (или периодических волн), причем амплитуда и форма импульса перенапряжения, проникающего в обмотки трансформатора, в значительной степени зависит от дальности атмосферного разряда, принятой защиты трансформаторной подстанции от перенапряжений, подходов к ней и т. п. Примерная форма импульса перенапряжений показана на рис. 2.65, а. Увеличение напряжения от нуля до максимума (фронт волны) происходит за очень короткий отрезок времени, измеряемый часто десятками долями микросекунды. Волна с крутым фронтом может рассматриваться как

$\frac{1}{4}$ периода переменного напряжения очень высокой частоты (10 — 50 кГц).

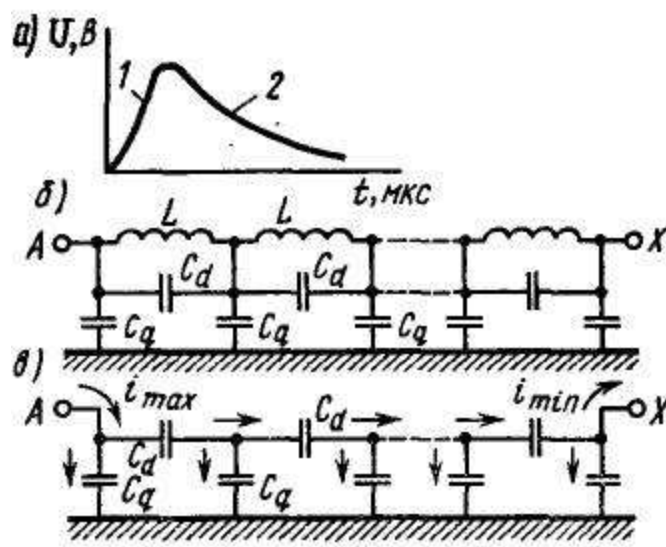


Рис. 2.65 - Форма волны перенапряжения и упрощенные схемы замещения первичной обмотки трансформатора при воздействии этой волны:

1 — фронт волны; 2 — хвост волны

Схема замещения при перенапряжениях. В полную схему замещения трансформатора кроме активных и индуктивных сопротивлений необходимо вводить емкостные сопротивления, обусловленные продольными емкостями C_d между отдельными элементами обмоток (витками и катушками) и поперечными емкостями C_q , между этими элементами и заземленными частями (магнитопровод, бак). При рабочей частоте 50 Гц созданные емкостями сопротивления весьма велики и практически не оказывают влияния на работу трансформатора. Однако при больших частотах, характерных для волн перенапряжения, влияние этих емкостей возрастает, так как по мере увеличения частоты индуктивное сопротивление X_L увеличивается, а емкостное X_C уменьшается. Следовательно, все большая часть тока начинает проходить через емкости C_d и C_q .

На рис. 2.65, б изображена упрощенная схема замещения входной обмотки трансформатора при перенапряжениях, в которой не учитывается активное сопротивление, а индуктивности L включают в себя как собственную, так и взаимные индуктивности каждого элемента обмоток. При подходе волны

напряжения к зажимам трансформатора напряжение на обмотке вследствие большой крутизны фронта волны быстро возрастает. Скорость этого процесса настолько велика, что ток сначала не проходит по виткам обмотки из-за большой их индуктивности, а проходит только по ее емкостной цепи (см. рис. 2.65, в). В этот момент обмотка действует как некоторая единая емкость $C_{вх} = \sqrt{C_{дрез} C_{qрез}}$, называемая входной. При этом значения продольной и поперечной составляющих входной емкости $C_{дрез} = 1/\sum C_d$ и $C_{qрез} = \sum C_q$.

Распределение напряжения по обмотке в начале переходного процесса.

При воздействии на трансформатор набегающей волны перенапряжения с крутым фронтом в схеме замещения входной обмотки возникает переходный процесс изменения тока и напряжения. В начальный момент в течение долей микросекунды возникает процесс заряда входной емкости. При этом при переходе волны напряжения из электрической линии (из цепи с меньшим волновым сопротивлением) в трансформатор (в цепь с большим волновым сопротивлением) напряжение на его входной обмотке сначала уменьшается до нуля, а затем возрастает и достигает двукратного значения амплитуды волны. При начальном заряде входной емкости токи и электрические заряды распределяются по емкостной цепи (рис. 2.65, в) от начала обмотки A к ее концу X неравномерно, так как по мере приближения к концу обмотки все большая часть тока ответвляется через поперечные емкости C_q в землю. Поэтому начальное распределение напряжения вдоль обмотки также неравномерно. Степень неравномерности зависит от коэффициента $\alpha = \sqrt{C_{qрез} / C_{дрез}}$. Решение системы дифференциальных уравнений, характеризующих распределение зарядов и напряжений вдоль емкостной цепи, имеет следующий вид:

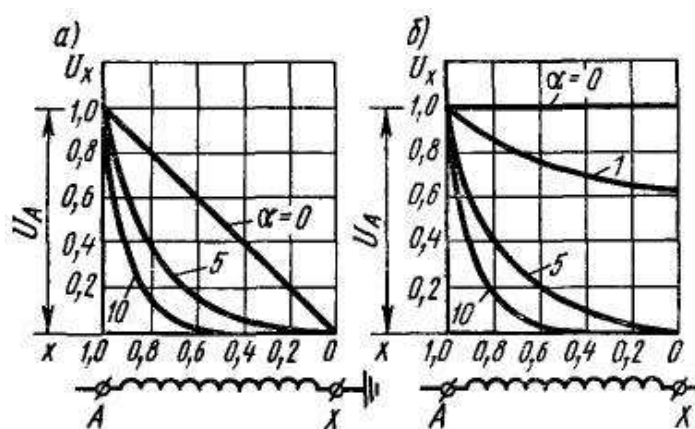


Рис. 2.66 - Начальные распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора при перенапряжениях для различных значений α

$$u_x = A_1 e^{ax} + A_2 e^{-ax}, \quad (2.102)$$

где x — относительное расстояние рассматриваемой точки обмотки от ее конца (принимая длину обмотки $l = 1$);

A_1 и A_2 — постоянные интегрирования, которые находятся из начальных условий.

При заземлении конца обмотки X уравнение (2.102) принимает вид

$$u_x = U_A (e^{ax} - e^{-ax}) / (2 \operatorname{sh} \alpha) = U_A \operatorname{sh} \alpha x / (\operatorname{sh} \alpha), \quad (2.103)$$

а при незаземленном конце

$$u_x = U_A (e^{ax} + e^{-ax}) / (2 \operatorname{ch} \alpha) = U_A \operatorname{ch} \alpha x / (\operatorname{ch} \alpha), \quad (2.104)$$

где U_A — амплитуда волны перенапряжения.

Полученные из уравнений (2.103) и (2.104) начальные распределения напряжений вдоль обмотки для различных значений α при заземленной и изолированной нейтрали изображены на рис. 2.66, *а* и *б*.

Обычно в трансформаторах $C_{\text{qрез}} > C_{\text{дрез}}$ и $\alpha = 5$ ч 15 , поэтому начальное распределение напряжения вдоль обмотки крайне неравномерно и почти одинаково для обмоток с заземленной и изолированной нейтралью. Кривые распределения напряжения показывают, что при перенапряжениях наибольшей опасности подвергается изоляция начальных витков и катушек, так как в начальные моменты на них падает максимальная часть напряжения.

Распределение напряжения по обмотке в течение переходного процесса.

По окончании переходного процесса в обмотках с заземленным концом напряжение распределено вдоль обмотки равномерно (рис. 2.67, а), а в обмотках с изолированным концом ко всем частям обмотки приложено одинаковое напряжение (рис. 2.67, б). Процесс проникновения волны перенапряжения в обмотку можно рассматривать как переход от начального распределения напряжения (кривые 1) к конечному (прямые 2). Индуктивности и емкости, имеющиеся в схеме замещения, образуют колебательные контуры, вследствие чего переходный процесс сопровождается возникновением высокочастотных электромагнитных колебаний. Амплитуда возможных колебаний напряжения в каждой точке обмотки равна разности ординат кривых 1 и прямых 2. Они совершаются относительно прямых 2 — конечного распределения напряжений, поэтому максимальные значения их ограничены кривыми 3. Штриховые кривые 4 на рис. 2.67 показывают характер распределения напряжения вдоль обмотки в некоторый момент времени после начала переходного процесса. С течением времени возникающие колебания из-за наличия активного сопротивления обмотки затухают.

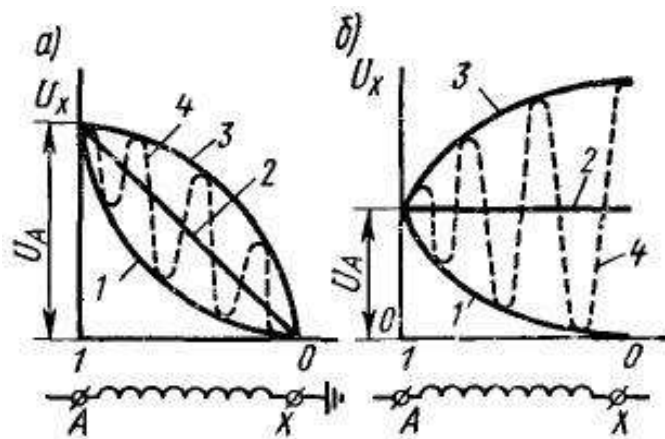


Рис. 2.67 - Распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора при высокочастотных колебаниях:

1 — начальное распределение; 2 — конечное распределение; 3 — граничные значения максимальных напряжений; 4 — изменение напряжения вдоль обмотки при колебательном процессе

Из рассмотрения кривых, приведенных на рис. 2.67, следует, что во время колебаний большие перепады напряжения возникают в средней и конечной частях обмотки. Кроме того, в отдельных частях обмотки напряжение относи-

тельно земли может стать больше амплитуды падающей на обмотку волны перенапряжения U_A . В частности, *при незаземленной нейтрали наибольшее напряжение падает на изоляцию конечных витков и катушек*. Это является существенным недостатком трансформаторов с изолированной нейтралью.

Защита от перенапряжений. Для предотвращения воздействия на трансформаторы волн перенапряжений с амплитудой, превышающей допустимую для данного класса изоляции, трансформаторные подстанции защищают заземленными тросами и разрядниками. Они обеспечивают снижение амплитуды падающей на трансформаторы волны перенапряжения.

В трансформаторах напряжением 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений в начале и конце обмотки ВН усиливают изоляцию первой и второй катушек, а также увеличивают вентиляционные каналы между ними. Нейтрали обмоток с напряжением 35 кВ и выше заземляют либо непосредственно либо через сопротивления, которые при высокочастотных колебаниях не оказывают существенного влияния на характер переходного процесса.

Для выравнивания начального распределения напряжения и сближения его с конечным распределением, а также для снижения опасных резонансных электромагнитных колебаний под воздействием волн перенапряжений в трансформаторах напряжением 110 кВ и выше применяют *емкостную защиту обмоток*. Сущность такой защиты заключается в том, что в конструкцию обмотки включают добавочные емкости $C_{\Sigma 1}$ и $C_{\Sigma 2}$ (рис. 2.68, а), выполненные в виде электростатических экранов, которые шунтируют продольные емкости C_d . В этом случае при заземлении конца X обмотки ВН кривая начального распределения напряжения I (см. рис. 2.67) приближается к прямой 2 конечного распределения.

Емкостная защита состоит из следующих элементов (рис. 2.68, б):

а) емкостного кольца I , установленного у входной катушки. Оно выравнивает электрическое поле в начале обмотки и представлено на принципиальной схеме (рис. 2.68, а) в виде емкости $C_{\Sigma 1}$. Емкостное кольцо изготавливают

из тонкой медной ленты шириной 20—30 мм, завернутой в кабельную бумагу и наматываемой в два слоя (бифилярно) на шайбу из электрокартона с закругленными краями;

б) экранирующих витков 3, выполненных в виде разомкнутых металлических колец, охватывающих несколько первых катушек обмотки и прикрепленных к ним. Они повышают электрические потенциалы у начальной и последующих катушек обмотки и представлены на принципиальной схеме (рис. 2.68, а) в виде емкостей C_{32} . Экранирующие витки выполняют из того же провода, что и витки катушек и имеют усиленную изоляцию. Для уменьшения емкостей C_{32} экранирующие витки катушек, более удаленных от начала, располагают на большем расстоянии от катушек обмотки, чем начальные витки. Все начала экранирующих витков и емкостное кольцо присоединяют к началу А обмотки, т. е. они имеют потенциал электрической линии. Трансформаторы с емкостной защитой называют *грузоупорными* или *нерезонирующими*, так как у них практически устранена опасность возникновения значительных резонансных колебаний в обмотках при воздействии периодических затухающих волн перенапряжения.

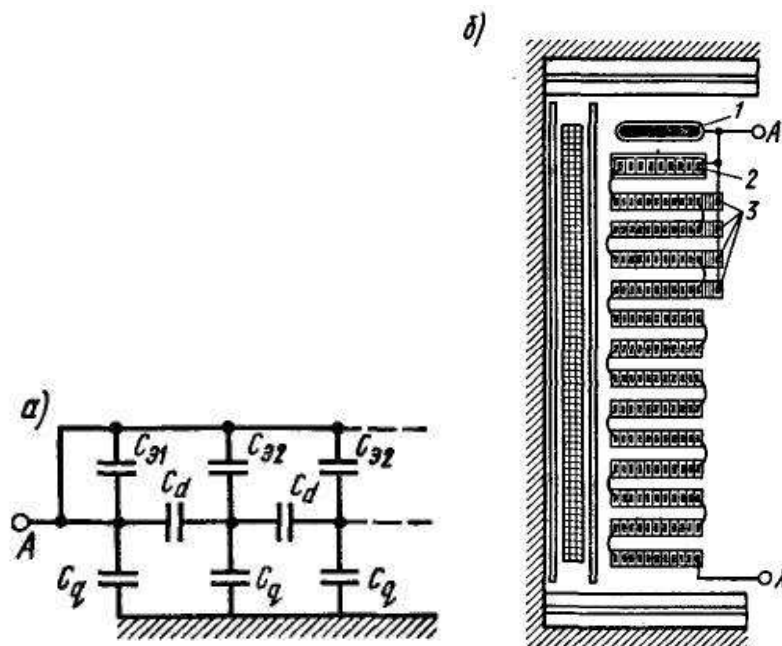


Рис. 2.68 - Принципиальная схема емкостной защиты и ее выполнение в трансформаторах напряжением 110 кВ

В трансформаторах напряжением 110 кВ и выше наряду с емкостной защитой начальные 2 и концевые катушки высоковольтных обмоток выполняются с усиленной изоляцией.

2.21 Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

При эксплуатации отдельные фазы трансформатора могут быть нагружены несимметрично из-за неравномерного распределения по фазам осветительной или другой однофазной нагрузки. Иногда имеются и несимметричные режимы, вызванные авариями — одно- и двухфазными короткими замыканиями в электрических сетях, питающихся от трансформаторов.

При несимметричных нагрузках ЭДС вторичных обмоток (а следовательно, и напряжения) могут существенно отличаться от их значений при нормальных, симметричных режимах, что отрицательно влияет на работу потребителей электрической энергии, особенно на лампы накаливания и на асинхронные двигатели.

Общий метод анализа несимметричных режимов. При анализе будем считать заданными:

1) первичные линейные напряжения, векторы которых образуют симметричную трехлучевую звезду (мощность питающей сети предполагается очень большой);

2) векторы вторичных токов, определяемые значением и характером нагрузки.

Общим методом анализа несимметричных режимов является метод симметричных составляющих, согласно которому трехфазная несимметричная система токов \dot{I}_a , \dot{I}_b и \dot{I}_c (рис. 2.69, а) разлагается на системы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, т. е. производится замена:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.105)$$

Векторы \mathcal{E}_{a1} , \mathcal{E}_{b1} и \mathcal{E}_{c1} создают систему векторов прямой последовательности (рис. 2.69, б), т. е. имеют то же чередование фаз, что и заданная система векторов \mathcal{E}_a , \mathcal{E}_b и \mathcal{E}_c . Следовательно, $\mathcal{E}_{b1} = e^{j4\pi/3} \mathcal{E}_{a1}$; $\mathcal{E}_{c1} = e^{j2\pi/3} \mathcal{E}_{a1}$. Система векторов обратной последовательности \mathcal{E}_{a2} , \mathcal{E}_{b2} и \mathcal{E}_{c2} (рис. 2.69, в) имеет обратное чередование фаз и характеризуется соотношениями $\mathcal{E}_{b2} = e^{j2\pi/3} \mathcal{E}_{a2}$ и $\mathcal{E}_{c2} = e^{j4\pi/3} \mathcal{E}_{a2}$. Напомним, что умножение вектора на $e^{j\pi}$ соответствует повороту вектора в сторону, противоположную вращению часовой стрелки.

Система векторов нулевой последовательности показана на рис. 2.69, г. Для нее характерно соотношение $\mathcal{E}_{a0} = \mathcal{E}_{b0} = \mathcal{E}_{c0}$.

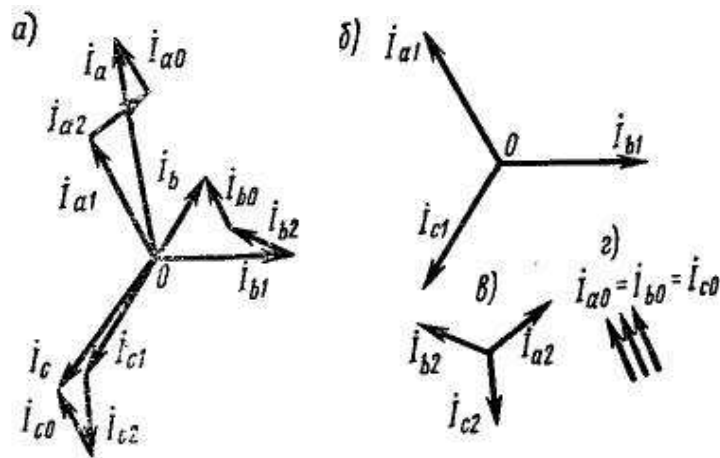


Рис. 2.69 - Разложение несимметричной системы токов (а) на симметричные составляющие (б, в, г)

Подставляя значения указанных векторов в (2.105) и учитывая, что сумма $1 + e^{j2\pi/3} + e^{j4\pi/3} = 0$, можно найти значения векторов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= (1/3)(\dot{I}_a + e^{j2\pi/3} \dot{I}_b + e^{j4\pi/3} \dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a2} &= (1/3)(\dot{I}_a + e^{j4\pi/3} \dot{I}_b + e^{j2\pi/3} \dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a0} &= (1/3)(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \end{aligned} \right\} \quad (2.106)$$

Несимметричная нагрузка при отсутствии токов нулевой последовательности. Из системы уравнений (2.106) следует, что $\mathcal{E}_a + \mathcal{E}_b + \mathcal{E}_c = 3\mathcal{E}_{a0}$. Таким образом, при наличии токов нулевой последовательности векторная сумма токов трех фаз отлична от нуля. Очевидно, что в трансформаторе токи нулевой последовательности могут возникать только тогда, когда хотя бы одна из обмоток имеет нулевой провод (или при заземлении нулевой точки, когда четвертым проводом служит земля). Следовательно, при схемах соединения об-

моток U/U , U/D , D/U и D/D токи нулевой последовательности всегда отсутствуют (они могут отсутствовать и в схемах с нулевым проводом, если ток в нем равен нулю).

Упрощенные схемы замещения для каждой фазы трансформатора при токах прямой и обратной последовательностей аналогичны схеме (см. рис. 2.33, а), полученной при симметричной нагрузке трансформатора. Это очевидно для токов прямой последовательности, так как симметричная нагрузка предполагает наличие только токов прямой последовательности. Если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, поменять местами два зажима со стороны первичной обмотки и два зажима со стороны вторичной обмотки, то режим работы не изменится. Однако чередование векторов токов фаз при этом изменяется на обратное, т. е. соответствует токам обратной последовательности. Следовательно, токи обратной последовательности трансформируются из одной обмотки в другую так же, как и токи прямой последовательности.

Сопротивление трансформатора относительно токов прямой и обратной последовательностей одинаково и равно сопротивлению короткого замыкания \underline{Z}_k . Вследствие этого при отсутствии токов нулевой последовательности можно не пользоваться методом симметричных составляющих, а рассматривать каждую фазу отдельно как независимый трансформатор.

Если вторичная обмотка соединена по схеме U , то фазные токи равны линейным. При соединении обмотки по схеме D линейные токи \mathcal{E}_a , \mathcal{E}_b и \mathcal{E}_c равны векторной разности фазных токов:

$$\mathcal{E}_a = \mathcal{E}_{af} - \mathcal{E}_{bf} ; \mathcal{E}_b = \mathcal{E}_{bf} - \mathcal{E}_{cf} ; \mathcal{E}_c = \mathcal{E}_{cf} - \mathcal{E}_{af} \quad (2.107)$$

и, кроме того:

$$\mathcal{E}_{af} + \mathcal{E}_{bf} + \mathcal{E}_{cf} = 0 , \quad (2.108)$$

так как токи нулевой последовательности отсутствуют. Решая совместно (2.107) и (2.108), получаем:

$$\mathcal{E}_{af} = (\mathcal{E}_a - \mathcal{E}_c)/3 ; \mathcal{E}_{bf} = (\mathcal{E}_b - \mathcal{E}_a)/3 ; \mathcal{E}_{cf} = (\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_b)/3 . \quad (2.109)$$

Фазные токи первичной обмотки определяются из условия равновесия

первичных и вторичных МДС. Пренебрегая намагничивающим током, для каждой из фаз, имеем

$$\mathcal{E}_{A\phi} = -\mathcal{E}_{a\phi}; \mathcal{E}_{B\phi} = -\mathcal{E}_{b\phi}; \mathcal{E}_{C\phi} = \mathcal{E}_{c\phi}, \quad (2.110)$$

где знак “штрих” показывает, что ток вторичной обмотки приведен к числу витков первичной обмотки.

Следовательно, для токов в первичной обмотке получаем такие же соотношения, как и для токов во вторичной обмотке (с учетом разницы в схемах их соединения).

Фазные первичные и вторичные напряжения имеют связь, определяемую уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{I}_{A\phi} \underline{Z}_k &= -\dot{U}'_a; \dot{U}_B - \dot{I}_{B\phi} \underline{Z}_k = -\dot{U}'_b; \\ \dot{U}_C - \dot{I}_{C\phi} \underline{Z}_k &= -\dot{U}'_c. \end{aligned} \quad (2.111)$$

Так как сопротивление короткого замыкания трансформатора \underline{Z}_k мало, различие в фазных токах (обусловленное несимметрией нагрузки) не приводит к существенной несимметрии вторичных напряжений, если токи нагрузки не превышают номинальные значения.

Несимметричная нагрузка при наличии токов нулевой последовательности. Рассмотрим случай несимметричной нагрузки с токами нулевой последовательности при соединении трансформаторов по схеме $Y_n Y_n$ (рис. 2.70, а). При этом токи нулевой последовательности замыкаются через нулевой провод и во вторичных, и в первичных обмотках. Пренебрегая намагничивающим током, для каждой из фаз обмоток можно составить уравнения (2.110), т. е. считать, что в каждой фазе наблюдается такое же равновесие МДС первичной и вторичной обмоток, как и при отсутствии токов нулевой последовательности. Вследствие этого в рассматриваемом случае справедливы уравнения (2.111), и искажение симметрии фазных вторичных напряжений незначительно.

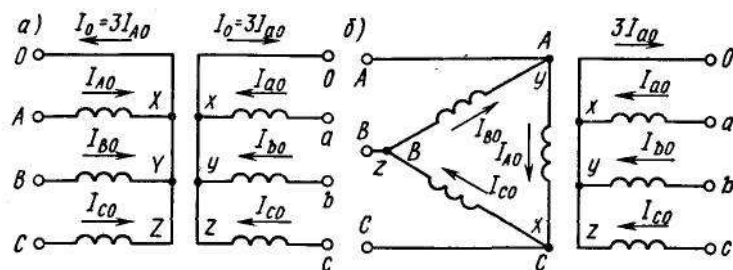


Рис. 2.70 - Токи нулевой последовательности при соединении обмоток трансформатора по схемам Y_n/Y_n и D/Y_n

Аналогично имеем при соединении трансформаторов по схеме Δ/Y_n (рис. 2.70, б). Хотя в линейных проводах первичной обмотки, соединенной треугольником, не может быть токов нулевой последовательности, в фазах первичной обмотки такие токи проходят. Это объясняется тем, что токи нулевой последовательности, проходящие по вторичным обмоткам, создают МДС, которая в свою очередь создает поток нулевой последовательности и соответствующие ЭДС в фазах первичной обмотки. Однако так как соединение треугольником для ЭДС и токов нулевой последовательности равносильно короткому замыканию, то весьма незначительный поток и ЭДС нулевой последовательности создают токи в первичной обмотке, практически полностью компенсирующие МДС токов той же последовательности, но замыкающихся по вторичной обмотке. Следовательно, и при схеме соединений Δ/Y_n справедливы соотношения (2.107) — (2.111).

Таким образом, при наличии токов нулевой последовательности и в первичных, и во вторичных обмотках трансформатора (схемы Y_n/Y_n и Δ/Y_n) МДС токов нулевой последовательности взаимно уравновешиваются в каждой фазе, вследствие чего симметрия фазных напряжений искажается слабо — только за счет падений напряжения $\mathcal{E}_\phi \underline{Z}_\kappa$.

Другие условия получаем при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_n , когда токи нулевой последовательности имеются только во вторичной обмотке (рис. 2.71, а), а в первичной обмотке эти токи физически не могут проходить, так как во всех фазах они совпадают по времени, а нулевой провод отсутствует.

Если вторичная обмотка при таком соединении нагружена несимметрично и содержит токи всех последовательностей, то вторичные токи прямой и обратной последовательностей вызывают в первичной обмотке соответствующие составляющие токов, которые создают сравнительно малые падения напряжения.

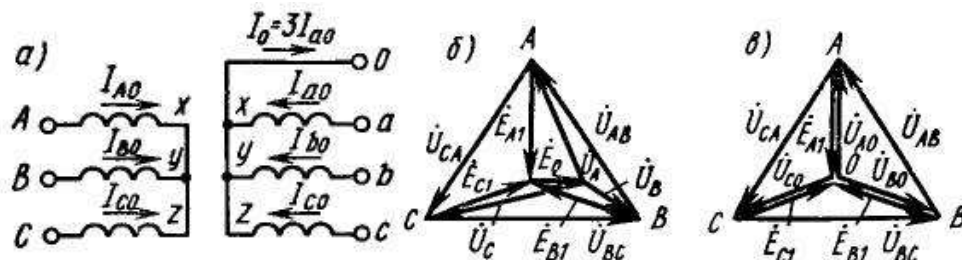


Рис. 2.71 - Токи нулевой последовательности при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_n и векторные диаграммы фазных и линейных напряжений при нагрузке и холостом ходе

Однако неуравновешенные со стороны первичной обмотки вторичные токи нулевой последовательности намагничивают сердечник и создают потоки нулевой последовательности. Потоки нулевой последовательности индуцируют в обеих обмотках ЭДС E_0 , которые складываются с ЭДС E_{A1} , E_{B1} и E_{C1} прямой последовательности. Поэтому

$$\dot{E}_A = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_0 ; \dot{E}_B = \dot{E}_{B1} + \dot{E}_0 ; \dot{E}_C = \dot{E}_{C1} + \dot{E}_0 . \quad (2.112)$$

При этом система первичных и вторичных фазных напряжений искажается, хотя система первичных линейных напряжений остается симметричной. Система вторичных линейных напряжений искажается мало, так как в разностях $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b$, $\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c$ и $\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a$ ЭДС нулевой последовательности исчезают.

На рис. 2.71, б показана упрощенная диаграмма напряжений трансформатора, включенного по схеме Y/Y_n при активной нагрузке в фазе ax (токи I_b и I_c равны нулю), где приближенно принято, что напряжение равно ЭДС. Фазные напряжения \dot{U}_A, \dot{U}_B и \dot{U}_C сильно искажены по сравнению с их значениями $\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{B0}, \dot{U}_{C0}$ при холостом ходе (рис. 2.71, в), что неблагоприятно влияет на потребители.

Особенно сильное искажение фазных напряжений происходит в броне-

вых и бронестержневых трансформаторах и в трехфазных группах, где поток нулевой последовательности может свободно замыкаться. В этих трансформаторах незначительный по величине ток нулевой последовательности (примерно равный току холостого хода) создает большую ЭДС E_0 . Поэтому соединение U/U_n в этих трансформаторах обычно не применяется.

В трехстержневых трансформаторах с соединением U/U_n токи нулевой последовательности меньше искажают фазные напряжения, так как потоки нулевой последовательности во всех стержнях совпадают по времени и, следовательно, могут замыкаться только по тому же пути, что и потоки рассеяния: через воздух (или масло), стяжные болты, стенки бака и др. Вследствие этого поток нулевой последовательности ослабляется и возникает сравнительно не большая ЭДС.

Трехстержневые трансформаторы с соединением обмоток по схеме U/U_n выполняют мощностью до 6000 кВ·А, при этом необходимо, чтобы ток в нулевом проводе не превышал 25 % номинального тока. При соблюдении данного условия фазные напряжения остаются практически симметричными.

Теоретический расчет сопротивлений для токов нулевой последовательности представляет собой очень сложную задачу, поэтому практически сопротивление определяется экспериментальным путем. Для этого три фазы обмотки, нормально включенной по схеме U_n , соединяют последовательно и подключают к источнику однофазного тока. Обмотку, соединенную нормально по схеме U , оставляют разомкнутой. Измерения производят обычным методом с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра.

Если обе обмотки соединены по схеме U_n или одна из обмоток соединена по схеме D , сопротивление для токов нулевой последовательности можно принять равным сопротивлению короткого замыкания, так как токи нулевой последовательности в каждой фазе с первичной и вторичной стороны магнитно уравновешены.

2.22 Измерительные трансформаторы

Области применения. Измерительные трансформаторы используют главным образом для подключения электроизмерительных приборов в цепи переменного тока высокого напряжения. При этом электроизмерительные приборы оказываются изолированными от цепей высокого напряжения, что обеспечивает безопасность работы обслуживающего персонала. Кроме того, измерительные трансформаторы дают возможность расширять пределы измерения приборов, т. е. измерять большие токи и напряжения с помощью сравнительно несложных приборов, рассчитанных для измерения малых токов и напряжений. В ряде случаев измерительные трансформаторы служат для подключения к цепям высокого напряжения обмоток реле, обеспечивающих защиту электрических установок от аварийных режимов.

Измерительные трансформаторы подразделяют на два типа — трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Первые служат для включения вольтметров, а также других приборов, реагирующих на значение напряжения (например, катушек напряжения ваттметров, счетчиков, фазометров и различных реле). Вторые служат для включения амперметров и токовых катушек указанных приборов. Измерительные трансформаторы изготавливают мощностью от пяти до нескольких сотен вольт-ампер; они рассчитаны для совместной работы со стандартными приборами (амперметрами на 1; 2; 2,5 и 5 А, вольтметрами на 100 и $100\sqrt{3}$ В).

Трансформатор напряжения. Его выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора (рис. 2.72, а). Для обеспечения безопасности работы обслуживающего персонала вторичную обмотку тщательно изолируют от первичной и заземляют. Условное обозначение трансформатора напряжения такое же, как двухобмоточного трансформатора.

Так как сопротивления обмоток вольтметров и других приборов, подключаемых к трансформатору напряжения, велики, то он практически работает в режиме холостого хода. В этом режиме можно с достаточной степенью точности считать, что

$$U_1 = U'_2 = U_2 k.$$

В действительности ток холостого хода I_0 (а также небольшой ток нагрузки) создает в трансформаторе падение напряжения, поэтому, как видно из векторной диаграммы (рис. 2.72,б), $U_2 \neq U'_2$ между векторами этих напряжений имеется некоторый сдвиг по фазе δ_u результате этого при измерениях образуются некоторые погрешности.

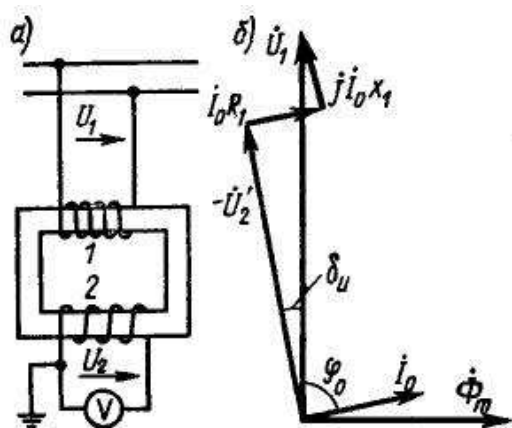


Рис. 2.72 - Схема включения и векторная диаграмма измерительного трансформатора напряжения : 1 - первичная обмотка; 2 - вторичная обмотка

В измерительных трансформаторах напряжения различают два вида погрешностей:

а) относительная погрешность напряжения

$$\gamma_u = [(U_2 k - U_1) / U_1] 100 \% ; \quad (2.113)$$

б) угловая погрешность δ_u ; за ее значение принимают угол между векторами U_1 и $-U'_2$. Она влияет на результаты измерений, выполненных с помощью ваттметров, счетчиков, фазометров и прочих приборов, показания которых зависят не только от силы тока и напряжения, но и от угла сдвига фаз между ними. Угловая погрешность считается положительной, если вектор U'_2 опережает вектор U_1 .

В зависимости от величины допускаемых погрешностей стационарные трансформаторы напряжения подразделяют на три класса точности: 0,5; 1 и 3; а лабораторные — на четыре класса: 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Обозначение класса соответствует величине относительной погрешности γ_u при номинальном напряжении $U_{ном}$.

Значения погрешностей стационарных трансформаторов напряжения согласно ГОСТу приведены в табл. 2.9.

Выпускаемые промышленностью трансформаторы напряжения сохраняют класс точности при изменении первичного напряжения от 80 до 120% номинального.

Для уменьшения погрешностей γ_n и d_n сопротивления обмоток трансформатора Z_1 и Z_2 делают по возможности малыми, а магнитопровод выполняют из высококачественной стали достаточно большого поперечного сечения, чтобы в рабочем режиме он не был насыщен. Благодаря этому обеспечивается значительное уменьшение тока холостого хода.

Трансформатор тока. Его выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора (рис. 2.73, а) или в виде проходного трансформатора, у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода.

Таблица 2.9

Класс точности	0,5	1	3
Максимальная относительная погрешность при напряжении (0,8 ÷ 1,2) $U_{ном}$, %	+ 0,5	±1,0	±3,0
Угловая погрешность, мин.	±20	±40	Не нормирована

В некоторых конструкциях магнитопровод и вторичная обмотка смонтированы на проходном изоляторе, служащем для ввода высокого напряжения в силовой трансформатор или другую электрическую установку. Первичной обмоткой трансформатора служит медный стержень, проходящий внутри изолятора (рис. 2.73, б).

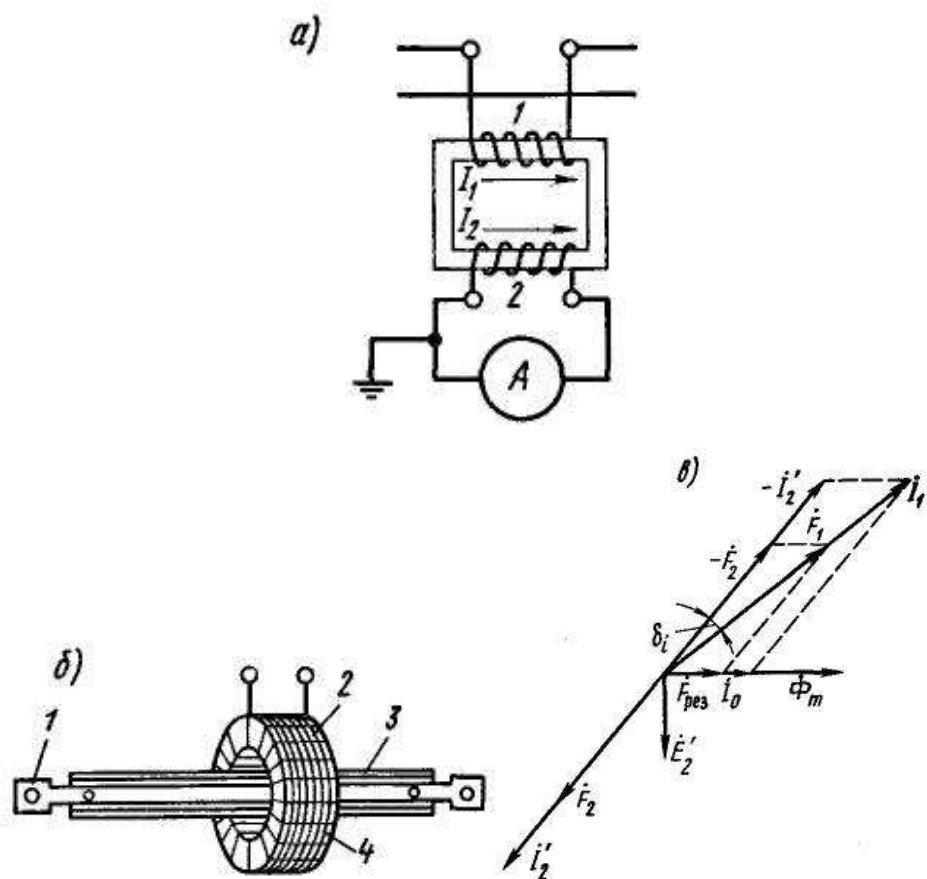


Рис. 2.73 - Схема включения трансформатора тока (а), общий вид проходного трансформатора (б) и векторная диаграмма (в): 1 — медный стержень (первичная обмотка); 2 — вторичная обмотка; 3 — изолятор; 4 — магнитопровод

Сопротивления обмоток амперметров и других приборов, подключаемых к трансформатору тока, обычно малы. Поэтому он практически работает в режиме короткого замыкания, при котором токи I_1 и I_2' во много раз больше тока I_0 , и с достаточной степенью точности можно считать, что

$$I_1 = I_2' = I_2/k. \quad (2.114)$$

В действительности из-за наличия холостого хода $I_0 \approx I_m$ в рассматриваемом трансформаторе $I_1 \neq I_2$ и между векторами этих токов имеется некоторый угол, отличный от 180° (рис. 2.71, в). Это создает относительную токовую погрешность

$$\gamma_i = [(I_2 k - I_1)/I_1] 100 \% \quad (2.115)$$

и угловую погрешность, измеряемую углом δ_i , между векторами I_1 и $-I_2'$. Погрешность δ_i считается положительной, если вектор $-I_2'$ опережает вектор I_1 .

В зависимости от значения допускаемых погрешностей трансформаторы тока подразделяют на пять классов точности: стационарные - на классы 0,2; 0,5; 1; 3 и 10; лабораторные - на классы 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Приведенные цифры соответствуют допускаемой для данного класса токовой погрешности при номинальном значении тока. Значения погрешностей стационарных трансформаторов тока согласно ГОСТу приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Класс точности	Первичный ток в процентах от номинального	Предельное значение погрешности		Пределы вторичной нагрузки в процентах от номинальной при $\cos \varphi_2 = 0,8$
		токовой, %	угловой, мин	
0,2	10	+ 0,50	+ 20	25-100
	20	+ 0,35	+ 15	
	100-120	$\pm 0,20$	± 10	
0,5	10	+ 1	+ 60	25-100
	20	+ 0,75	+ 45	
	100-120	$\pm 0,50$	± 30	
1	10	+ 2	+ 120	25-100
	20	+ 1,5	+ 90	
	100-120	± 1	± 60	
3	50-120	± 3	Не нормируется	50-100
10	50-120	± 10	То же	50-100

2.23 Трансформаторы для вентильных преобразователей

При использовании трансформаторов в вентильных преобразователях в цепи их вторичных обмоток включают электрические вентили, пропускающие ток только в одном направлении. Характерной особенностью этих трансформаторов является *неодновременная нагрузка отдельных фаз, связанная с поочередным отпиранием вентилей, включенных в соответствующие фазы*. Это обстоятельство вызывает ряд неблагоприятных последствий, основные из которых — *наличие в кривых первичного I_1 и вторичного I_2 токов значительных высших гармонических и дополнительное подмагничивание сердечника при не-*

которых схемах выпрямления.

Схемы соединения обмоток. В рассматриваемых трансформаторах различают сетевую обмотку, подключаемую к питающей сети, и вентильную обмотку, к которой подключают вентили преобразователя.

Обычно сетевые обмотки трехфазных трансформаторов соединяют по схеме *У* или *Д*. Вентильные обмотки соединяют так, чтобы обеспечить преобразование одно- или трехфазного тока в многофазный с числом фаз, необходимым для соответствующей схемы преобразователя. *При увеличении числа фаз преобразователя резко уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения.* В табл. 2.11 приведены схемы соединения вентильных обмоток в векторном изображении при различных схемах включения вентилях. Так, например, в схеме № 1 вентильная обмотка имеет три вывода: от начал *1* и *2* и от средней точки *0* (нулевой вывод). Поэтому она преобразует однофазный ток в двухфазный со сдвигом по фазе между вторичными напряжениями, равный 180° . В схеме № 5 вентильная обмотка подразделена на две обратные звезды (*1-3-5* и *2-4-6*) и преобразует трехфазный ток в шестифазный со сдвигом по фазе между вторичными напряжениями, равный 60° . Уравнительный реактор, включенный между нулевыми точками двух звезд вентильной обмотки, обеспечивает возможность параллельной работы двух соседних фаз этой обмотки, при сдвиге индуцируемых в них ЭДС на 60° . Этим достигается лучшее использование трансформатора.

Таблица 2.11

№ схе- мы	Схема	Схема соеди- нения вентиль- ной обмотки в векторном изо- бражении	Степень сгла- живания тока	U_{40} U_{20}	I_2 I_d	I_1 I_d	S_T $P_{\text{дном}}$
1	Однофазная ну- левая		Идеально сглаженный	0,90	0,707	1,0	1,34
			Несглажен- ный		0,785	1,11	1,48
2	Однофазная мостовая		Идеально сглаженный	0,90	1,0	1,0 1,11	1,11 1,23
			Несглажен- ный		1,11		
3	Трехфазная ну- левая (“трехфаз- ный зигзаг”)		Идеально сглаженный Несглажен- ный	1,17	$\frac{0,577}{0,587}$	$\frac{0,471}{0,481}$	$\frac{1,34/1,46^8}{1,37/1,48}$
4	Трехфазная мос- товая		Идеально сглаженный	$\frac{2,34^9}{1,35}$	$\frac{0,816}{0,471}$	$\frac{0,816}{0,471}$	1,05
5	Две обратные звезды с уравни- тельным реакто- ром		То же	1,17	0,289	0,408	1,26
6	Двенадцати- фазная мостовая		То же	4,68	$\frac{0,816^{10}}{0,471}$	1,57	1,02

В схеме № 6 трехфазный ток также преобразуется в шестифазный, но если к двум частям вентильной обмотки 1-3-5 и 2-4-6 подключить два трехфазных вентильных моста и соединить их последовательно, то выпрямленное напряжение по кратности пульсаций будет соответствовать 12-фазной системе

⁸ В числителе – при соединении вентильной обмотки по схеме Y_n , в знаменателе – при соединении ее по схеме Z_n

⁹ В числителе – при соединении вентильной обмотки по схеме Y , в знаменателе – при соединении ее по схеме D .

¹⁰ В числителе – для вентильной обмотки, соединенной Y , в знаменателе – для обмотки, соединенной D .

вторичных напряжений. В этой схеме фазное напряжение обмотки, соединенной по схеме Δ , должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чем у обмотки, соединенной по схеме Y .

В табл. 2.11 указаны также основные соотношения электрических параметров для приведенных схем; при этом приняты следующие обозначения: U_{d0} — среднее значение напряжения между положительным и отрицательным выводами преобразователя при холостом ходе без учета падения напряжения в выпрямителе и тока холостого хода в схеме с уравнительным реактором; U_{20} — действующее значение напряжения в фазе вентильной обмотки при холостом ходе; I_2 и I_1 — действующие значения тока в фазах вентильной и сетевой обмоток (значение тока I_1 указано при коэффициенте трансформации $k = 1$); I_d — среднее значение тока на стороне постоянного тока преобразователя; S_T — типовая мощность трансформатора; $P_{dном}$ — номинальная мощность на стороне постоянного тока преобразователя.

Типовая мощность трансформатора. В трансформаторах, предназначенных для вентильных преобразователей, по первичной и вторичной обмоткам проходят несинусоидальные токи, содержащие ряд высших гармонических. Это происходит по следующим причинам:

а) вентили, включенные в цепи отдельных фаз вторичной обмотки, пропускают ток только в течение части периода;

б) на стороне постоянного тока преобразователя обычно включают сглаживающий дроссель значительной индуктивности, при котором токи в обмотках трансформатора имеют форму, близкую к прямоугольной.

В общем случае токи I_1 и I_2 имеют разные действующие значения, вследствие чего расчетные мощности первичной $S_{1ном}$ и вторичной $S_{2ном}$ обмоток неодинаковы. Поэтому вводится понятие типовой мощности трансформатора вентильного преобразователя

$$S_T = 0,5(S_{1ном} + S_{2ном}) . \quad (2.116)$$

и коэффициент типовой мощности

$$k_T = S_T / P_{\text{дн\text{ом}}} , \quad (2.117)$$

где $P_{\text{дн\text{ом}}} = U_{\text{дн\text{ом}}} I_{\text{дн\text{ом}}}$ – мощность, потребляемая на стороне постоянного тока преобразователя (выходная мощность). Здесь $I_{\text{дн\text{ом}}}$ и $U_{\text{дн\text{ом}}}$ — номинальные значения тока и напряжения на стороне постоянного тока.

Пиковая мощность вентильного трансформатора S_T больше его выходной мощности $P_{\text{дн\text{ом}}}$ при номинальной нагрузке. Поэтому габаритные размеры и масса таких трансформаторов всегда больше, чем у трансформаторов той же номинальной мощности $S_{\text{ном}} = m U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}$, но работающих при синусоидальном токе. Физически это объясняется тем, что нагрев обмоток трансформатора определяет действующие значения токов I_1 и I_2 , которые в данном случае содержат ряд высших гармонических. При работе трансформатора в цепи синусоидального тока высших гармонических нет, нагрев трансформатора при той же выходной мощности меньше, а поэтому его можно выполнить с меньшими габаритными размерами и массой.

Каждой схеме включения вентиля и характеру нагрузки (активная, активно-индуктивная), определяющему форму выпрямленного тока, соответствует определенное значение типовой мощности S_T . Для примера определим величину S_T для однофазной схемы выпрямления с нулевым выводом трансформатора (рис. 2.74) при идеализированных условиях работы преобразователя (полностью сглаженным выпрямленным токе I_d , мгновенном переходе тока с одного вентиля на другой, отсутствии индуктивностей X_1 и X_2 трансформатора и потерь энергии в нем). Полные мощности вторичной и первичной обмоток равны:

$$S_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} = [\pi / (2\sqrt{2})] k U_{\text{дн\text{ом}}} I_{\text{дн\text{ом}}} / k = 1,11 P_{\text{дн\text{ом}}} ;$$

$$S_{2\text{ном}} = 2 U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} = [2\pi / (2\sqrt{2})] U_{\text{дн\text{ом}}} I_{\text{дн\text{ом}}} / \sqrt{2} = 1,57 P_{\text{дн\text{ом}}} ,$$

где соотношения $U_d / U_2 = U_d / U_{20}$, I_2 / I_d и I_1 / I_d берутся из табл. 2.11.

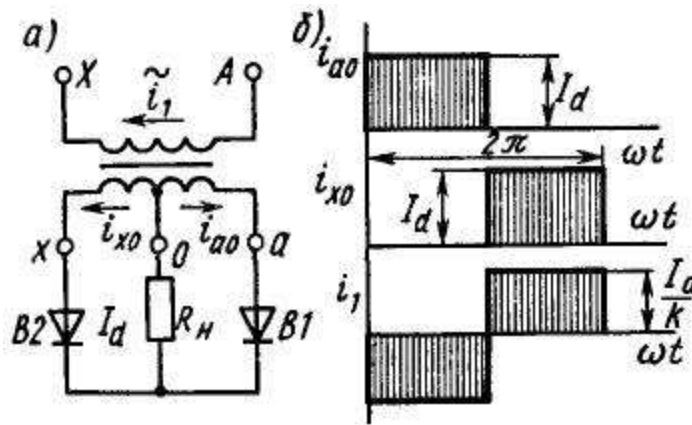


Рис. 2.74 - Однофазная нулевая схема выпрямления (а) и графики изменения токов в сетевой и вентильной обмотках трансформатора (б)

Таким образом, типовая мощность трансформатора

$$S_T = 0,5(S_{1ном} + S_{2ном}) = 0,5(1,11 + 1,57)P_{дном} = 1,34P_{дном}, \quad (2.118)$$

а коэффициент типовой мощности $k_T = 1,34$.

При однофазной мостовой схеме выпрямления (рис. 2.75) имеем:

$$S_{1ном} = U_{1ном} I_{1ном} = [\pi / (2\sqrt{2})] k U_{дном} \frac{I_{дном}}{k} = 1,11 P_{дном};$$

$$S_{2ном} = U_{2ном} I_{2ном} = [\pi / (2\sqrt{2})] U_{дном} I_{дном} = 1,11 P_{дном}.$$

В результате типовая мощность трансформатора $S_T = 1,11 P_{дном}$, а коэффициент типовой мощности $k_T = 1,11$. Следовательно, при мостовой схеме выпрямления трансформатор используется лучше, чем при схеме с нулевым выводом.

Аналогично можно определить коэффициенты типовой мощности трансформаторов для других схем выпрямления. Их значения для указанных идеализированных условий приведены в табл. 2.11.

При работе преобразователя на чисто активную нагрузку токи вентильной и сетевой обмоток имеют кусочно-синусоидальную форму (т. е. представляют собой части синусоиды), вследствие чего при одинаковом значении тока I_d их действующие значения больше, чем при идеально сглаженном выпрямленном токе. В результате типовая мощность трансформатора также больше.

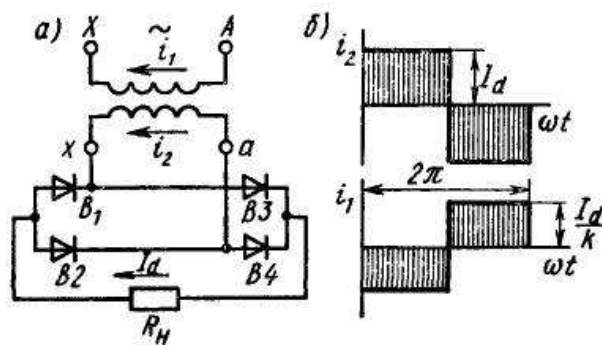


Рис. 2.75 - Однофазная мостовая схема выпрямления (а) и графики изменения токов в сетевой и вентильной обмотках трансформатора (б)

При использовании в преобразователе управляемых вентилей типовая мощность трансформатора может возрасти, если номинальное выпрямленное напряжение $U_{\text{дном}}$ соответствует некоторому заданному значению угла регулирования вентилей $\alpha_{\text{ном}}$, отличному от нуля. Это может быть, например, в случае, если необходимо обеспечить стабильное значение $U_d = U_{\text{дном}}$ при уменьшении напряжения U_1 в питающей сети (когда требуется иметь некоторый запас по напряжению U_2). В этом случае коэффициент типовой мощности

$$k_m = k_{m.o} / \cos \alpha_{\text{ном}} ,$$

где $k_{\text{т.о}}$ — значение коэффициента типовой мощности для соответствующей схемы включения вентилей при отсутствии регулирования.

Подмагничивание сердечника трансформатора. При нулевых схемах выпрямления (одно-, трех- и шестифазной) нарушается равновесие МДС в фазах сетевой и вентильной обмоток, расположенных на общем стержне трансформатора, вследствие чего происходит дополнительное подмагничивание его магнитной системы. Эти схемы называют *однотактными*, так как при работе преобразователя ток по каждой фазе вентильной обмотки проходит только в одном направлении. Дополнительное подмагничивание магнитопровода трансформатора возникает также и при применении однополупериодной схемы выпрямления.

Рассмотрим более подробно это явление на примере трехфазной нулевой схемы (рис. 2.76, а), работающей при указанных идеализированных условиях. В этом случае через три фазы вентильной обмотки трансформатора в течение

каждой трети периода поочередно проходят токи i_{2a} , i_{2b} и i_{2c} прямоугольной формы (рис. 2.76, б), мгновенное значение которых равно I_d . По первичной обмотке трансформатора также проходят токи i_{1A} , i_{1B} и i_{1C} прямоугольной формы. Однако распределение этих токов по отдельным фазам неравномерно.

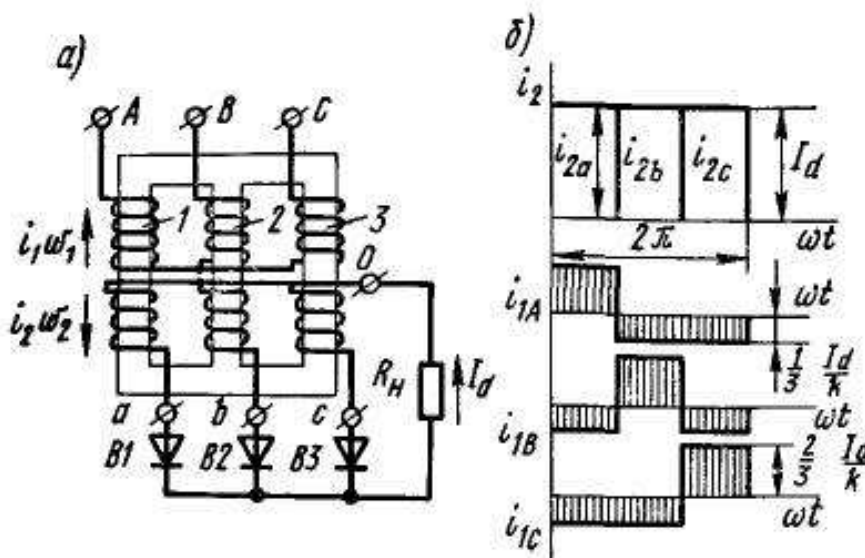


Рис. 2.76 - Трехфазная нулевая схема выпрямления (а) и графики изменения токов в сетевой и вентильной обмотках (б)

В течение первой трети периода, когда работает вентиль $B1$, ток i_{2a} равен I_d , а токи i_{2b} и i_{2c} равны нулю. Токи в фазах первичной обмотки можно определить, исходя из первого закона Кирхгофа для электрических цепей:

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0, \quad (2.119)$$

а также из условий равновесия МДС для замкнутых магнитных контуров, один из которых охватывает стержни 1, 2 трансформатора:

$$i_{1A}w_1 - i_{2a}w_2 - i_{1B}w_1 = 0, \quad (2.120)$$

а другой — стержни 2 и 3:

$$i_{1B}w_1 - i_{1C}w_1 = 0. \quad (2.121)$$

Решая совместно полученные уравнения, получаем для первой трети периода:

$$\left. \begin{aligned} i_{1A} &= (2/3)i_{2a}w_2/w_1 = (2/3)I_d/k; \\ i_{1B} &= -(1/3)i_{2a}w_2/w_1 = -(1/3)I_d/k; \\ i_{1C} &= -(1/3)i_{2a}w_2/w_1 = -(1/3)I_d/k. \end{aligned} \right\} \quad (2.122)$$

Следовательно, в каждом стержне трансформатора в указанный период времени действует нескомпенсированная МДС, равная $i_1 w_1 - i_2 w_2 = - (1/3) I_d w_2$, которая создает дополнительный магнитный поток Φ_d , накладывающийся на основной поток Φ . Из диаграммы распределения токов по обмоткам (рис. 2.76, б) видно, что в следующие две трети, когда работают вентили В2 и В3, направление и величина потока Φ_d не изменяются, поскольку относительное распределение тока между первичными и вторичными обмотками сохраняется.

Дополнительный поток Φ_d называют *поток вынужденного намагничивания*. Он проходит через каждый стержень трансформатора и замыкается через воздух и кожух так же, как и третьи гармонические основного потока (см. рис. 2.42). Для того чтобы поток Φ_d не вызвал недопустимого насыщения магнитной системы, увеличивают общее сечение стержней, что приводит к увеличению массы, габаритных размеров и стоимости трансформатора. Поэтому *трехфазную нулевую схему выпрямления применяют лишь в выпрямителях сравнительно небольшой мощности*. Обычно в выпрямителях используют только такие схемы включения вентиля, которые обеспечивают нормальное намагничивание сердечника трансформатора и равновесие МДС на каждом стержне. К числу их относятся: мостовые одно- и трехфазная, так как при использовании их ток в каждой фазе вентильной обмотки дважды за период изменяет свое направление. Не возникает потока вынужденного подмагничивания и при соединении вентильной обмотки по схеме “две обратные звезды с уравнительным реактором”. *При нулевых схемах выпрямления для устранения явления вынужденного подмагничивания вентильную обмотку соединяют по схеме Z_n* . В этом случае в соединенных в Z_n двух частях вентильной обмотки появляются постоянные составляющие МДС, но они в любой момент времени направлены встречно и взаимно компенсируются. Для обеспечения более полной компенсации применяют также симметричное расположение обмоток на стержнях и их транспозицию, в частности, при однофазной нулевой схеме выпрямления.

Регулирование напряжения. В преобразовательных устройствах при регулировании выпрямленного напряжения путем изменения угла регулирования α управляемых вентилей (тиристоров) резко уменьшается коэффициент мощности преобразователя. Поэтому для плавного изменения выпрямленного напряжения обычно применяют комбинированный способ регулирования. При этом осуществляют ступенчатое изменение напряжения, подаваемого на преобразователь от трансформатора, а в пределах каждой ступени плавно изменяют выпрямленное напряжение тиристорами. Применяют два метода плавного регулирования напряжения — регулирование с вентильным переходом и бесконтактное регулирование с несколькими выпрямительными мостами, подключенными к секциям трансформатора.

При регулировании с вентильным переходом напряжение, подаваемое на вентили преобразователя, изменяют путем подключения их к различным выводам вторичной обмотки трансформатора переключателями $П1, П2, П3, П4$ (рис. 2.77, *а*); при этом тиристоры служат для плавного регулирования напряжения между ступенями и обеспечивают вентильный переход, т. е. размыкание контактов переключателей без разрыва тока. Для этой цели два плеча выпрямителя, собранного, например, по мостовой схеме, расщеплены и снабжены тиристорами $B1, B2, B3, B4$.

Регулирование напряжения начинается с включения переключателя $П1$ при закрытых тиристорах $B1$ и $B3$. Напряжение U_d на нагрузке R_n равно нулю. Постепенно открывая тиристоры $B1$ и $B3$, увеличивают среднее выпрямленное напряжение U_{d1} на нагрузке, подавая на нее все большую и большую часть напряжения U_c с первой секции трансформатора. Форма выпрямленного напряжения в процессе такого регулирования при некотором значении угла α_1 изображена на рис. 2.77, *б* в виде заштрихованных площадок. После полного открытия тиристоров $B1$ и $B3$ выпрямленное напряжение достигает значения U_{dmax} , соответствующего углу регулирования $\alpha_1 = 0$. Затем включают переключатель $П2$ и постепенно открывают тиристоры $B2$ и $B4$.

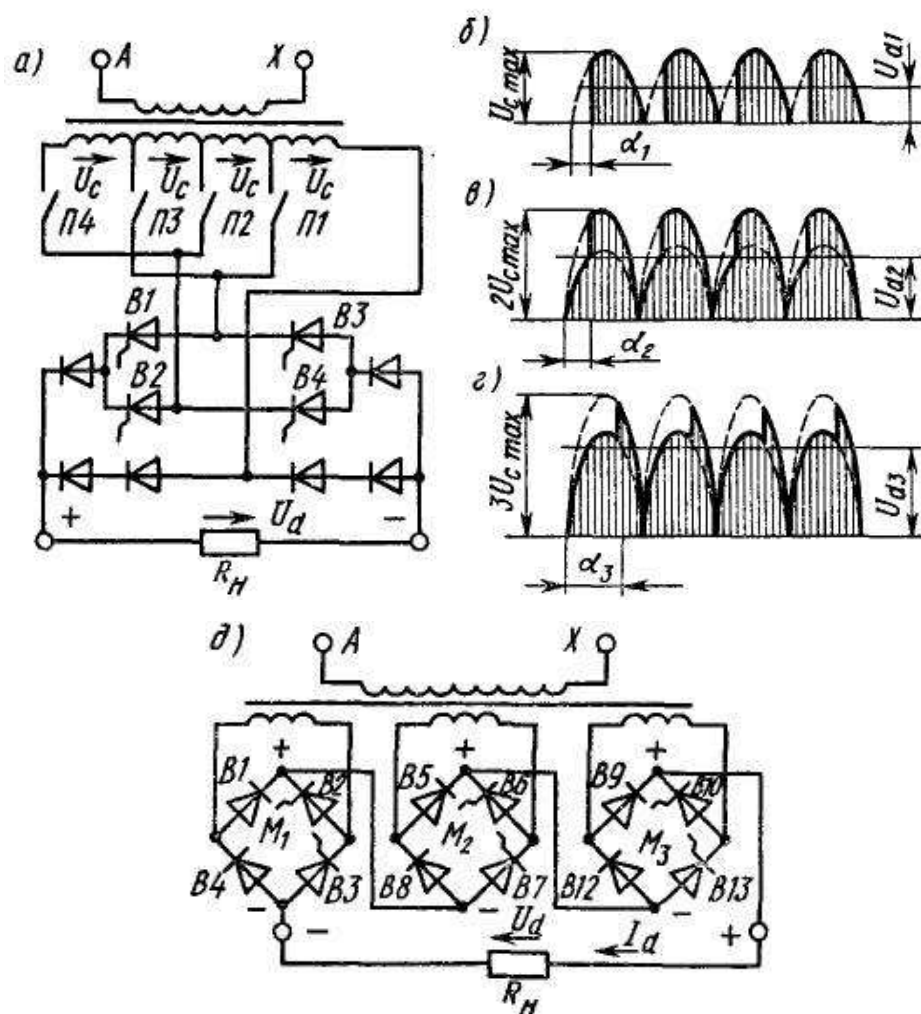


Рис. 2.77 - Схемы плавного регулирования напряжения на выходе вентильного преобразователя и кривые изменения этого напряжения в процессе регулирования

В моменты, когда тиристоры $B2$ и $B4$ открыты, на выпрямительный мост подается напряжение $2U_c$, снимаемое с первых двух секций вторичной обмотки трансформатора, а в моменты, когда эти тиристоры закрыты,— напряжение U_c , снимаемое только с первой секции. При этом к напряжению U_{dmax} добавляется часть напряжения U_c второй секции трансформатора, определяемая углом α_2 открытия тиристоров $B2$ и $B4$. Выпрямленное напряжение на нагрузке имеет в этом случае форму, показанную в виде заштрихованных площадок на рис. 2.77, в. Так как по мере уменьшения угла α_2 возрастает заштрихованная площадь в кривой выпрямленного напряжения, то соответственно увеличивается и среднее выпрямленное напряжение U_{d2} .

При полном открытии тиристоров $B2$ и $B4$ выпрямленное напряжение достигает U_{d2max} , весь ток проходит через переключатель $\Pi 2$. Далее закрыва-

ются тиристоры $B1$ и $B3$, размыкается переключатель $П1$ и замыкается переключатель $П3$, после чего регулирование производится плавным открытием тиристоров $B1$ и $B3$. В моменты, когда открыты тиристоры $B1$ и $B3$, на выпрямительный мост подается напряжение $3U_c$, снимаемое с первых трех секций трансформатора, а когда они закрыты — напряжение $2U_c$, снимаемое с первых двух секций. Форма выпрямленного напряжения при этом имеет вид заштрихованных площадок (рис. 2.77, $г$). Среднее выпрямленное напряжение $U_{d3} > U_{d2}$ возрастает по мере уменьшения угла α_3 .

При бесконтактном регулировании с несколькими выпрямительными мостами к секциям вторичной обмотки трансформатора подключают ряд последовательно соединенных выпрямительных мостов — $M1$, $M2$ и $M3$ (рис. 2.77, $д$), у которых в двух плечах включены неуправляемые вентили, а в двух других плечах — тиристоры. Для повышения напряжения на нагрузке R_n сначала постепенно открывают тиристоры $B2$ и $B3$ моста $M1$ путем плавного изменения их угла регулирования α_1 . Выпрямленное напряжение U_{d1} при этом изменяется так, как показано на рис. 2.77, $б$. Ток нагрузки I_d проходит от положительного вывода моста $M1$ (рис. 2.77, $д$) через неуправляемые вентили $B8$ и $B5$ моста $M2$, вентили $B12$ и $B9$ моста $M3$, нагрузку R_n к отрицательному выводу моста $M1$. После полного открытия тиристоров $B2$ и $B3$ моста $M1$ дальнейшее повышение напряжения на нагрузке R_n осуществляется путем изменения угла регулирования α_2 тиристоров $B6$ и $B7$ моста $M2$ (рис. 2.77, $в$). Затем таким же образом постепенно открываются тиристоры $B10$ и $B11$ моста $M3$ (рис. 2.77, $д$), что приводит к дальнейшему повышению выпрямленного напряжения (рис. 2.77, $г$). При таком способе регулирования напряжения отпадает необходимость в какой-либо переключающей аппаратуре, что облегчает конструкцию и повышает надежность работы выпрямительной установки.

2.24 Трансформаторы для электродуговой сварки, преобразования числа фаз и частоты

Сварочные трансформаторы. Эти трансформаторы представляют со-

бой понижающие однофазные сухие трансформаторы со вторичным напряжением при холостом ходе 60 — 75 В. Такое напряжение необходимо для надежного зажигания электрической дуги. При номинальной нагрузке вторичное напряжение уменьшается до 30 В.

При работе сварочных трансформаторов короткое замыкание является нормальным эксплуатационным режимом. Поэтому для ограничения тока короткого замыкания и устойчивого горения дуги такой трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику, а цепь сварочного тока должна обладать значительной индуктивностью. Для этого в сварочных трансформаторах обмотки размещают на различных стержнях магнитопровода и их соединяют последовательно, вследствие чего сопротивление короткого замыкания Z_k и напряжения u_k оказывается у них в несколько раз больше, чем у обычных силовых трансформаторов. Между обмотками располагают подвижные магнитные шунты, позволяющие изменять магнитные потоки рассеяния и осуществлять этим регулирование сварочного тока.

В некоторых типах сварочных трансформаторов последовательно со вторичной обмоткой включают реактор L с переменной индуктивностью (рис. 2.78, а). Регулируя индуктивность реактора (изменяя воздушный зазор в его магнитопроводе), изменяют форму внешней характеристики 1 или 2 трансформатора (рис. 2.78, б) и ток дуги I_{21} или I_{22} соответствующий напряжению горения дуги U_d .

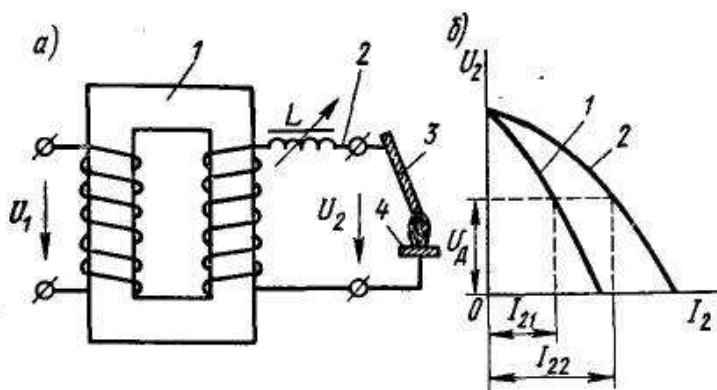


Рис. 2.78 - Электрическая схема (а) и внешние характеристики (б) сварочного трансформатора: 1 — трансформатор; 2 — реактор с переменной индуктивностью; 3 — электрод; 4 — свариваемая деталь

В некоторых конструкциях реактор непосредственно встраивают в сварочный трансформатор. Такой трансформатор имеет три обмотки: первичную 1 (рис. 2.79), вторичную 3 и обмотку реактора 4, расположенные на общем магнитопроводе. Среднее ярмо 2 является общим для цепей трансформатора и реактора. Обмотки 3 и 4 включены таким образом, что магнитный поток, создаваемый обмоткой реактора 4 в ярме 2, направлен против основного потока, создаваемого первичной обмоткой 1. Благодаря этому существенно возрастает магнитное рассеяние в трансформаторе при сравнительно небольшом поперечном сечении ярма 2. Из-за наличия в цепи нагрузки большой индуктивности сварочные трансформаторы работают с низким $\cos\phi = 0,4 \text{ ч } 0,5$.

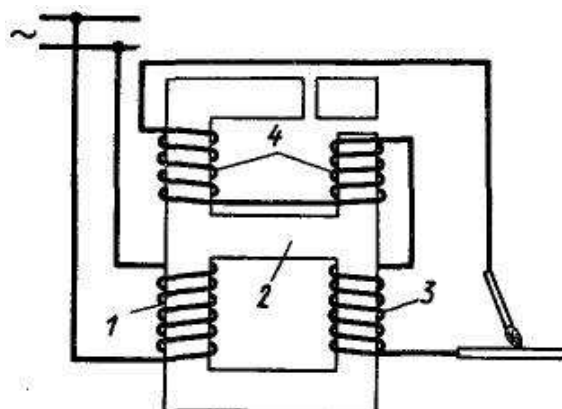


Рис. 2.79 - Электромагнитная схема сварочного трансформатора с встроенным реактором

Трансформаторные схемы для преобразования числа фаз. При питании однофазных нагрузок большой мощности от сети трехфазного тока из-за неравномерности нагрузок отдельных фаз возникают значительные искажения симметрии трехфазных напряжений. В этом случае для выравнивания нагрузок фаз применяют специальные схемы включения трансформаторов: схему трехфазно-двухфазного преобразования (называемую иногда схемой Скотта) и схему включения двух однофазных трансформаторов (или двух фаз трехфазного трансформатора) в открытый треугольник. Эти схемы используют, в частности, для питания переменным током контактной сети электрифицированного транспорта.

В схеме трехфазно-двухфазного преобразования используют два одно-

фазных трансформатора $Tr1$ и $Tr2$ (рис. 2.80, а) с различными коэффициентами трансформации. Трансформатор $Tr1$ называют *базовым* и включают между двумя фазами трехфазной сети. Трансформатор $Tr2$ называют *высотным* и включают между третьей фазой сети и средней точкой первичной обмотки трансформатора $Tr1$. При таком включении напряжения \dot{U}_{BC} и \dot{U}_{AO} (рис. 2.80, б) сдвинуты по фазе на угол 90° . На такой же угол сдвинуты и вторичные напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 . Для получения одинаковых по величине вторичных напряжений коэффициент трансформации трансформатора $Tr2$ должен быть в $\sqrt{3}/2$ раз больше, чем трансформатора $Tr1$. При симметричной нагрузке вторичной цепи токи в первичной трехфазной цепи также являются симметричными. Если нагрузки Z_{H1} и Z_{H2} не равны, то одна из фаз трехфазной сети загружена эквивалентной мощностью $P_{\text{экв}} = P_1 - P_2$.

При использовании схемы “открытый треугольник” (рис. 2.80, в, г) эквивалентная однофазная нагрузка трехфазной сети имеет порядок большей из нагрузок P_1 или P_2 . Если бы питание нагрузок Z_{H1} и Z_{H2} происходило от однофазного трансформатора, то на одну фазу приходилась бы нагрузка $P_1 + P_2$.

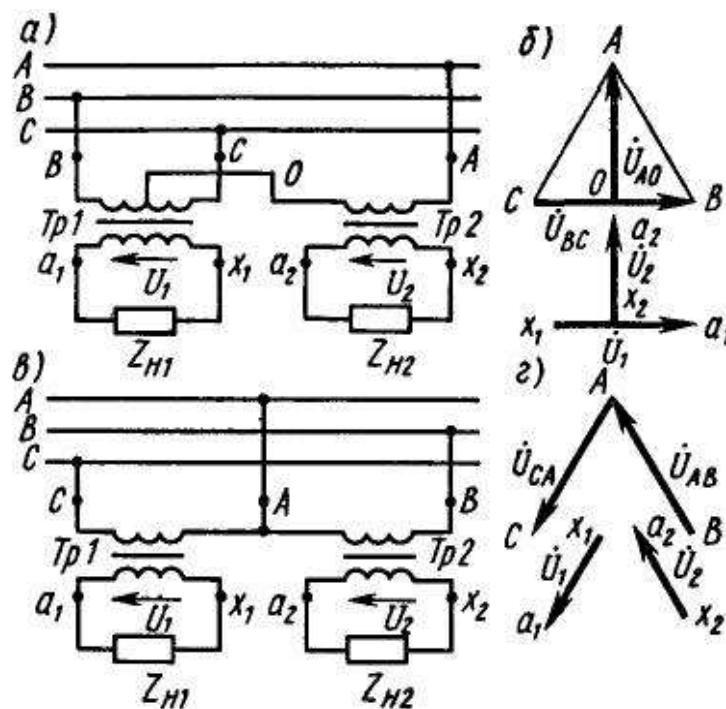


Рис. 2.80 - Трансформаторные схемы для преобразования трехфазного тока в однофазный (а) и (в) и их векторные диаграммы (б, г)

Преобразование частоты. Наибольшее применение получили трансформаторные схемы для удвоения и утроения частоты. Утроение частоты необходимо, в частности, в преобразователях, выполненных по схеме “две обратные звезды с уравнительным реактором”, для устранения скачков выпрямленного напряжения при работе с малой нагрузкой.

Трансформаторная схема для удвоения частоты (рис. 2.81, а) состоит из двух однофазных трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$, каждый из которых имеет три обмотки: первичную 1, подмагничивающую 3 и вторичную 2. Первичные обмотки этих трансформаторов соединены встречно, а вторичные и подмагничивающие — согласно. Поэтому в течение первого полупериода питающего напряжения u_1 в одном из трансформаторов действует сумма МДС ($F_{\text{пм}} + F_{\text{м}}$), а в другом - их разность ($F_{\text{пм}} - F_{\text{м}}$), где $F_{\text{пм}}$ и $F_{\text{м}}$ — МДС, создаваемые подмагничивающей и первичной обмотками.

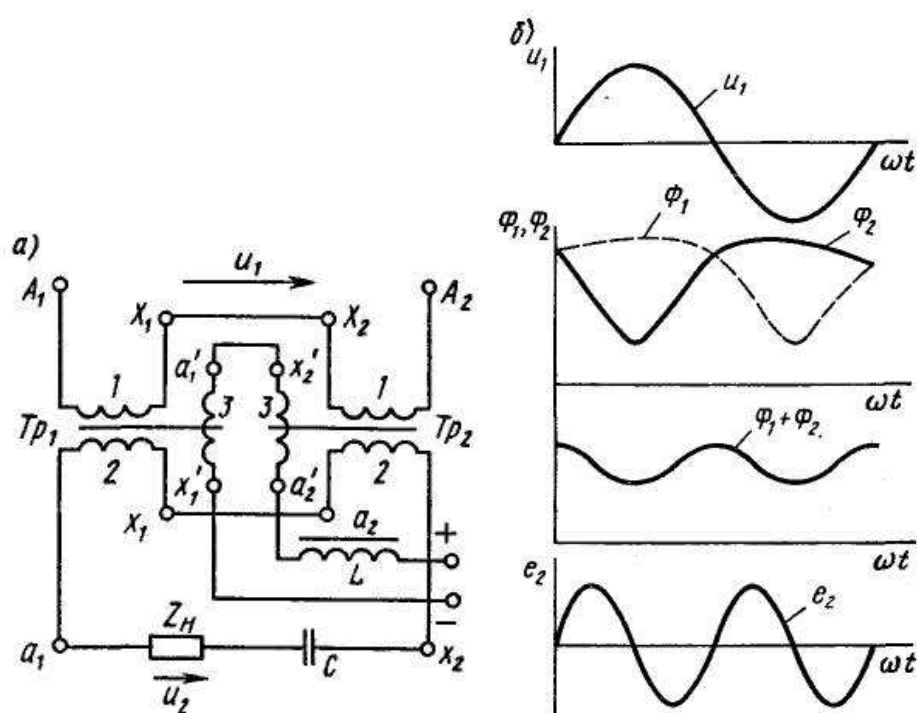


Рис. 2.81 - Трансформаторная схема для удвоения частоты (а) и кривые изменения напряжения, потоков и ЭДС (б)

В результате магнитопровод в первом трансформаторе насыщается и его поток Φ_1 приобретает уплощенную форму (рис. 2.81, б), в кривой же потока Φ_2 в магнитопроводе второго трансформатора появляется значительный провал.

В следующий полупериод направление F_m изменяется, а направление F_{pm} остается неизменным, что приводит к соответствующему изменению формы кривых Φ_1 и Φ_2 : они оказываются сдвинутыми относительно друг друга на 180° . Таким образом, кривые Φ_1 и Φ_2 имеют несимметричную форму, а следовательно, содержат как четные, так и нечетные гармонические.

При встречном включении первичных обмоток индуцируемая в них результирующая ЭДС e_1 уравнивающая первичное напряжение u_1 создается разностью потоков Φ_1 и Φ_2 . Эта разность изменяется с частотой f_1 питающего напряжения и не содержит четных гармонических. Результирующая ЭДС, индуцированная в соединенных согласно вторичных обмотках, создается суммой потоков $(\Phi_1 + \Phi_2)$, которая не содержит первую и другие нечетные гармоники. Поэтому вторичная ЭДС e_2 и вторичное напряжение u_2 определяются в основном второй гармонической потоков Φ_1 и Φ_2 , т. е. изменяются с двойной частотой $2f_1$. Выходное напряжение U_2 можно регулировать, изменяя силу тока в подмагничивающих обмотках. Для того чтобы по подмагничивающим обмоткам не протекали переменные токи, созданные четными гармоническими ЭДС, в цепь их питания включают реактор L . Первая и другие нечетные гармонические ЭДС в них взаимно компенсируются благодаря согласному включению этих обмоток.

Для компенсации падения напряжения во вторичных обмотках последовательно с нагрузкой Z_n обычно включают емкость C . Она повышает cos φ схемы удвоения частоты и уменьшает наклон ее внешней характеристики.

Трансформаторные схемы для утроения частоты основаны на использовании третьей гармонической, возникающей при насыщении сердечников трансформаторов, подключенных к сети трехфазного тока с частотой f_1 . В 2.21 показано, что при соединении вторичной обмотки трансформатора по схеме Д третьи гармонические ЭДС отдельных фаз совпадают по времени; при этом по обмотке циркулируют токи тройной частоты. Следовательно, выполняя сердечник трансформатора насыщенным (чтобы третьи гармонические ЭДС имели большую величину) и соединяя вторичные обмотки в “открытый треуголь-

ник” (рис. 2.82, а), на подключенную к ним нагрузку Z_H можно подавать напряжение тройной частоты $3f_1$.

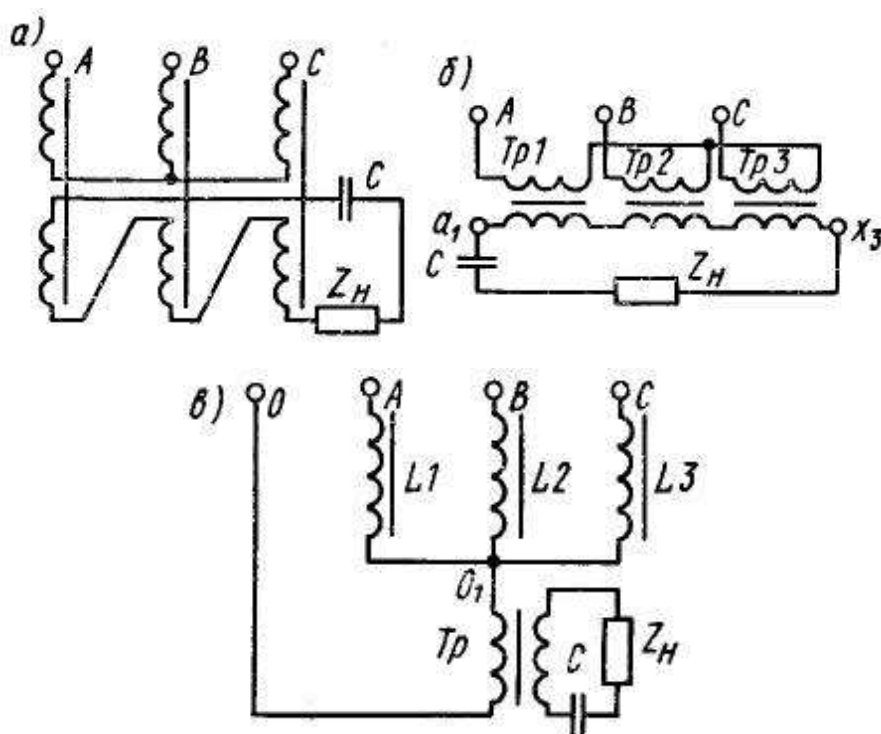


Рис. 2.82 - Трансформаторные схемы для утроения частоты

Тот же результат получается при использовании трех отдельных однофазных трансформаторов $Tr1$, $Tr2$, $Tr3$ (рис. 2.82, б) или одного однофазного трансформатора Tr и трех реакторов $L1$, $L2$, $L3$ с насыщенным магнитопроводом (рис. 2.82, в). При этом ток в каждом из реакторов не синусоиден и содержит значительную по величине третью гармоническую. В нулевой точке O_1 сумма токов основной частоты f_1 равна нулю; токи частоты $3f_1$ складываются, и по первичной обмотке трансформатора Tr проходит ток, равный утроенному значению этих токов в каждом реакторе. Поэтому во вторичной обмотке трансформатора индуцируется ЭДС тройной частоты. Для компенсации падения напряжения в трансформаторах, которое при тройной частоте значительно возрастает, последовательно с нагрузкой Z_H включают емкость C .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоиздат, 2004.
2. Брускин Д.Э., Зерохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. Т.1,2. – М.: Высш. шк., 1987.
3. Токарев Б.Ф. Электрические машины, - М.: Энергоиздат, 1990.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование энергетических машин. Учебник. – М.: Высш. шк., 2001.
5. Гольдберг, Свириденко Я.С. Проектирование электрических машин. Учебник для ВТУзов. – М.: Высш. шк., 2001.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1988.
7. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1990.
8. Вольдек А.И. Электрические машины . – Л.: Энергия, 1984.

Навчальне видання

**Глебова Марина Леонідівна,
Кузнецов Анатолій Іванович,
Карпалюк Ігор Тимофійович,
Чернявська Маргарита Василівна**

Навчальний посібник

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ. ТРАНСФОРМАТОРИ

(для студентів і слухачів другої вищої освіти напряму підготовки
6.050701 «Електротехніка та електротехнології»,
6.050702 «Електромеханіка»)

(Рос. мовою)

Редактор: *З.М. Москаленко*

Коректор: *З.І. Зайцева*

План 2007, поз. 342

Підп. до друку 05.02.07	Формат 60 x 84 1/16
Друк на ризографі.	Ум. друк. арк. 7,6
Тираж 100 пр.	Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 731 від 19.12.2001